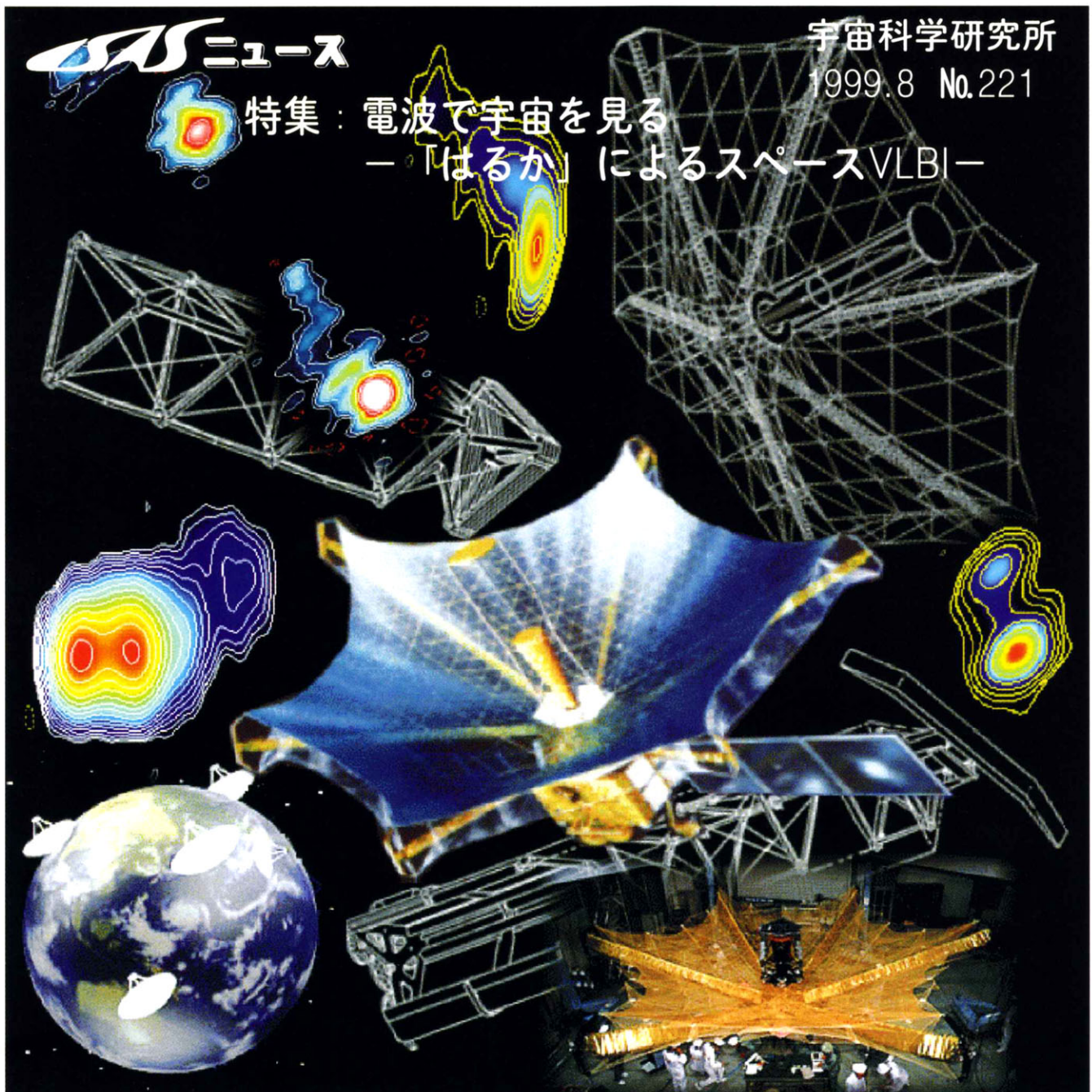




特集号によせて

ISASニュース編集委員長 松尾弘毅

「はるか」は1997年2月12日 M-V型ロケットで打ち上げられました。待望久しいM-Vの初号機であったこと、衛星は工学実験衛星という位置づけでしたが、引き続き天文観測が世界中の電波天文学者の期待を集めていたことなど、大変内容の濃い、緊張感溢れるミッションでした。工学実験にしても、展開アンテナの調整作業を工場で見たときには思わずウンと唸ったものです。

しかし、打ち上げに成功した「はるか」は順調に素晴らしい成果を挙げ、ここに特集号をお贈り出来ることになりました。関係者の努力に心から敬意を表します。

ISASニュースに限って言えば、先のM-V特集とあわせ、これを以てM-V初号機のミッションが完結することになります。力作です。

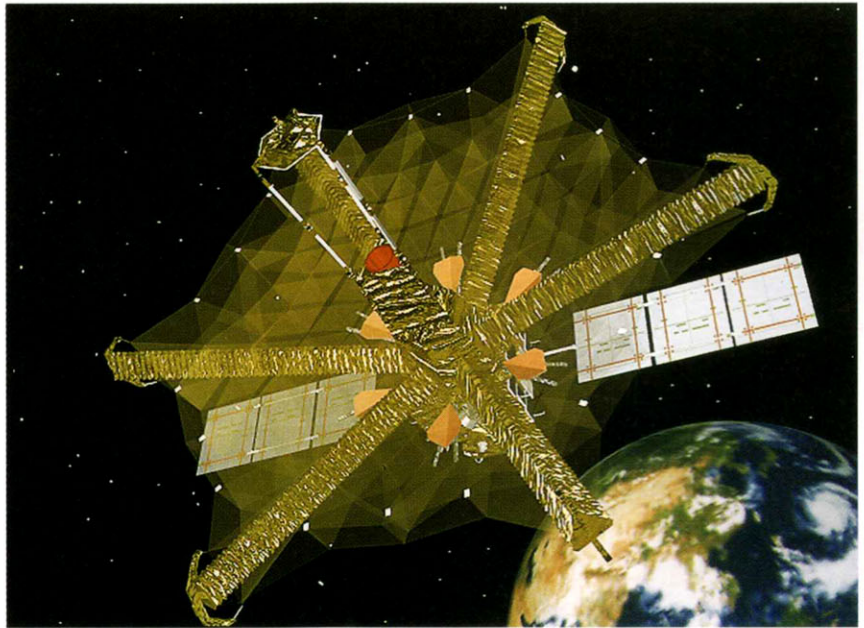
「はるか」がなし遂げたこと

「はるか」は、打ち上げ前の名称 MUSES-Bが示すように、工学実験衛星として立案されました。目的はスペースVLBIに必要な工学技術の実験を行うことでした。M-Vロケットの初号機により予定の軌道に打ち上げられ、スペースVLBIによる電波天文観測に成功を取めた現在、「はるか」は、世の中では、海外を含めて、電波天文衛星と見なされています。

宇宙研の工学実験衛星の定義は、科学観測のための衛星に先立って、それに必要な工学技術の実験をあらかじめ行う、というものですが、「はるか」の場合、一つの衛星で、工学実験と科学観測をともに行なってしまったことになります。この二重の役割は、実は、MUSES-Bの計画が始まった当初から予定されていたものでした。

MUSES-Bの開発が始まったばかりの1989年の12月、宇宙研でスペースVLBIの国際シンポジウムが開かれています。そこには13カ国、53名に達する海外の研究者が参加しました。MUSES-Bによって電波天文観測が行えるという期待があってこそ、その人達は、はるばる海を越えて相模原まで来られたのでした。衛星の開発と、観測のための国際協力の体制作りは、MUSES-B計画の開始当初から平行して進められました。スペースVLBI観測のためには、海外の電波天文台や宇宙機関の協力は欠かせません。MUSES-B計画は始めから広い国際性をもつものとなっていました。

MUSES-Bが目標とした主な工学的課題は、大型パラボラアンテナの展開と精密な鏡面の形成、大型の構造物をもつ衛星の姿勢制御、低雑音の受信、大容量デー



タ伝送、位相基準信号の地上から衛星への伝送（フェーズトランスファー）、精密軌道決定、相関処理技術などでした。これらの基本的な部分は衛星打ち上げ後全てが達成され、「はるか」は、スペースVLBIのための電波望遠鏡衛星として機能しうものとなりました。

実験の経過を振り返ってみます。1997年2月12日の衛星打ち上げからおよそ2週間経った2月24日から28日にかけて、有効直径8mの大型アンテナを、無事展開しました。この展開は「はるか」において最も難度の高い実験とみなされていたものでした。3月12日には、「はるか」と臼田の専用地上局の間で、フェーズトランスファーと大容量データ伝送のリンクが成立しました。3月24日には、アンテナを水酸基メーザー源W49Nに向け、天体からの電波を初受信しました。5月に入って干渉実験へと進み、「はるか」と臼田の64mアンテナがPKS1519-273というクェーサーを観測したデータ

宇宙科学研究所の第16号科学衛星MUSES-Bは、新規開発されたM-V-1号機により、1997年2月12日13時50分（日本標準時間）、鹿児島宇宙空間観測所から打ち上げられ、地球周回の長楕円軌道に投入されました。衛星は軌道投入後、「はるか」と名付けられました。

MUSES-Bは8m大型展開アンテナ、精密姿勢制御、多周波低雑音受信機、位相基準信号の伝送、Ku帯大容量データ伝送、高精度軌道決定など、スペースVLBI（Very Long Baseline Interferometer、超長基線干渉計）の実現に必要な諸技術の工学実験

を行うことを目的に開発され、これらの技術の確立の上でスペースVLBIによる電波天文観測を国際協力で行う、という大変意欲的な衛星計画でした。

工学実験は担当者の努力によりそれぞれ目標を達成し、その技術の上に「はるか」はスペースVLBI観測を行う宇宙電波望遠鏡として様々な科学的成果を上げてきました。

なお、「はるか」の英名“HALCA”には、“Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy”（通信・天文超高等実験室）が当てられており、関係者の心意気の高さが示されています。

私は、平成2年に「はるか」のPM設計が始まったときから、システム設計担当としてこのプロジェクトに参加し、平成9年2月の打ち上げに至るまで、「はるか」一筋（演歌みたいですね）の生活でした。

科学衛星プロジェクトの良いところ（やりがいの有る所）は、達成すべき目標が非常に明確で、各人がその目標に共感できることでしょう。

「はるか」のプロジェクトのメンバーも、個性豊かな先生方、色々な企業文化を持ったメーカー人の集まりで、本来、なかなかまとまりにくい集団のような気がしましたが、世界初の宇宙電波望遠鏡を作

るという明確な目標に共感した人が集まったことで、メンバーのベクトルは、0.01度の指向精度で、揃っていたと思います。

その成果が開花したのが、なんと言っても、打ち上げ後まもなく行われたアンテナ展開オペレーションの成功でしょう。

大型アンテナ、姿勢、熱、システムの各チームが相互に信頼しあっての連係作業は完璧で、アンテナが完全に展開した時の感激は今も忘れられません。

（日本電気・萩野慎二）

について、5月13日、干渉縞の検出に成功しました。この干渉縞の初検出は、「はるか」と、併せて開発した関連地上系が、スペースVLBIのためのシステムとして機能することを実証したものでした。この段階で「はるか」の工学実験の主要な目標は達成され、世界最初のスペースVLBIのための衛星が実現しました。6月中旬には、NRAO（米国立電波天文台）、JPL（米国ジェット推進研究所）等との協力のもとに、キューサーの初のイメージングに成功しました。それ以降、「はるか」が、世界に広がる国際協力のもとに、多くの実験的成果、観測の成果を挙げてきたことは、本特集号においても詳しく述べられる通りです。

「はるか」は宇宙研の新型ロケットM-Vの初号機によって打ち上げられました。M-Vの開発は1990年に始まっており、MUSES-Bの開発・製作はそれと平行して進行してきました。「はるか」の成功はM-V初号機の成功を併せて飾るものとなり、「はるか」はM-V初号機と一体となって歴史に残ることとなりました。「はるか（MUSES-B）」チームは、宇宙研、国立天文台を中心とするメンバーと、衛星や地上系の開発・製作を担当頂いたメーカー各社の大勢の方々からなります。MUSES-Bの開発の過程で、そして軌道上での実験・運用においてさまざまな難関に出会いましたが、



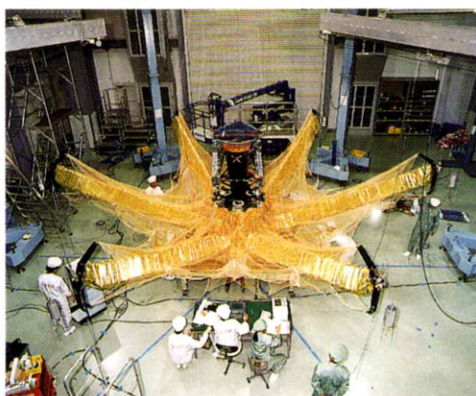
チームが一体となった取り組みと担当の方々の献身的な努力によって、それらを乗り越えてくることができました。「はるか」によるスペースVLBI観測では、アメリカ、オーストラリア、カナダ、他の数多くの研究者が海を越えて「はるか」チームの一員となり、大きな貢献をされました。スペースVLBIのための衛星を実現したこと、スペースVLBIのための国際協力を成立させたこと、そして数々の電波天文観測上の成果から、「はるか」は、さらに、次の世代のスペースVLBI衛星への道を実際に開いたものと思います。「はるか」をご支援いただいた研究所内外の多くの方々に、この紙面を借りて、心からお礼を申し上げます。

（廣澤春任）

大型パラボラアンテナの展開まで

「はるか」の目的のひとつは大型精密展開構造機構の研究です。このアンテナの有効径は8mですが、外周も考慮すると直径10mの大型構造物となります。衛星本体は展開後のアンテナに比べるとその付け根にちょこんと小さく見えます。またVLBI観測のためには、正確なパラボラ面を形成しなければなりません。太陽電池のパドルも展開構造ですが、必要な電力を得るために平面度の要求はそれほど厳しくなく、そのような構造体に比べると格段に精密な構造精度が要求されます。もちろん展開構造によらなければならないですから伸展マストをはじめさまざまな機構が必要になります。「はるか」のアンテナでは宇宙構造物工学における、そのような先進的な課題に取り組むこととなりました。宇宙科学研究所では1年ないしは2年にひとつの割合で比較的小型の科学衛星システムの開発を着実に成功させてきましたので、いつの間にか世界でも最先端の大型精密展開機構の実証を自ら試みることになったのです。しかも初めての試みにもかかわらず、電波天文観測のためには、相当の確度で成功させなければなりません。そのために多くの困難がありました。そのひとつひとつを乗り越えていく過程で、宇宙構造物工学の研究上の多くの新しい知見を得ることができました。

開発検討の当初は構造精度を出すための構



造様式の検討に殆どの時間がさかれました。最近注目されだしている膨張風船形式のインフレータブル膜面を使ったアンテナも検討されましたが、結局、比較的伸びの少ないケーブルネットワークにメッシュ鏡面を組み合わせたアンテナ様式を開発することになりました。これを三浦先生はテン

ショントラスアンテナと名付けました。三角形形状のケーブルネットワークの各節点の位置は幾何学的にほぼ一意的に決まります。この構造パターンはジオデシクトラスと呼ばれています。通常通信などの用途に必要なアンテナ面はこのトラスに膜面を張れば十分ですが、天文観測のためにはさらにこの膜面を引っ張って、もっとパラボラ面に近づける必要がありました。そのために1,000に近い調整ケーブルの長さを少

しずつ緩めたり引っ張ったりしながら、鏡面調整を行いました。ケーブルにはケブラという高分子材料を使用しましたが、ケブラは吸湿すると縮みますので、組立室の湿度管理は十分気をつけました。このアンテナ鏡面は軌道上の無重力の状態では正確なパラボラ面になるように調整されるわけですが、構造が大きすぎて地上では重力の影響を大きく受け、試験してみることができません。そこで、実際のアンテナ鏡面を表現する数学モデルをなるべく正確に求めて、この数学モデルで重力の影響がある地上での鏡面の位置を計算して、それに合うように鏡面調整をしました。これは大変な調整作業でしたが、最終的には0.81mmRMSという高



精度の鏡面を達成することができました。鏡面が最終的にセットされるまでに何回かの展開試験が行われて、そのたびに鏡面が絡まったりするところを全部なくしていきましたが、ある時には膜面のほつれを女性技術者が縫い合わせるということもありました。なにぶん、今までの常識を越えた膜面構造物でしたから、関係者全員総力を挙げての取り組みでした。

「はるか」の大型アンテナは外径が10mもあり、我々がこれまで作ったものではもっとも巨大な展開構造物で、設計の方法、構造解析の方法、使用する材料、試験のやりかたなどなにもかも新しく作り出す必要がありました。

何千本ものケーブルをいかに緩まずにはりめぐらすことができるか、鏡面をいかにひっかかりなく、最後まで開かせることができるか、鏡面精度をいかにして出すか等が最大の課題でした。何度も展開試験を繰り返しました。最初はひっかかりが甚だしく、とても最後まで開ける見込みはないようにおもえましたが、そのうちにどの部分がどのようなひっかかりをするかが明確になり、ひっかかり防止用膜をはりめぐらせることにより解決できました。鏡面の調整は約1000本のネジで行いました。鏡面形状を1回測定しその結果にもとづいて調整を行うのに約5日かかり、それを繰り返して結局鏡面調整に10ヶ月かかりました。

この鏡面は伸展マストにより展開され保持されます。宇宙研では磁気センサーの保持などにヒンジレスマストと呼ばれる我が国独自の優秀な伸展マストを使用していますが、「はるか」では前記のアンテナ鏡面を保持するためにさらに強力な伸展マストが必要になりました。SFUの二次元展開機構実験に用いた関節型の伸展マストをさらに改良した高剛性マストにより、安定した展開や収納が可能になりました。図はマストブーツをはずした状態での高剛性マストとそれにより張られている鏡面の様子です。このマストはヒンジやスクリュージャッキなどの多くの機構からなっています。そのため力を加えたままで展開させたりすると、思いも寄らない挙動が現れたりして苦労しましたが、最終的には信頼性の高い伸展マストを作り上げることができました。軌道上での実際の展開は予想以上に順調に推移しましたが、もちろんすべて思い通りというわけではありませんでした。鏡面を保持しているプレートの2枚がスムーズに開かず、また軌道上で鏡面の抵抗力が増えたことにより6本目の伸展マストのロックに大変手間取りました。それ以外にもさまざまな緊急のケースを想定しそれらの対策も事前に考えられていましたが、最悪ケースに至らずに済むことができました。

この大型精密展開構造機構の実現により、多くの関連の技術や経験が宇宙研や事業団の衛星に応用され、この分野で世界の最先端に伍することとなりましたのは、関係者全員の多年にわたる努力の結果と思っています。（名取通弘）

宇宙に大きな展開パラボラアンテナを花のように開かせる、ということは我々のような宇宙構造技術者にとって、ひとつの大きな夢でした。「はるか」の大型アンテナ開発に携わり、その夢を実現する機会が与えられたことに、感謝しています。

（三菱電機・井上登志夫）

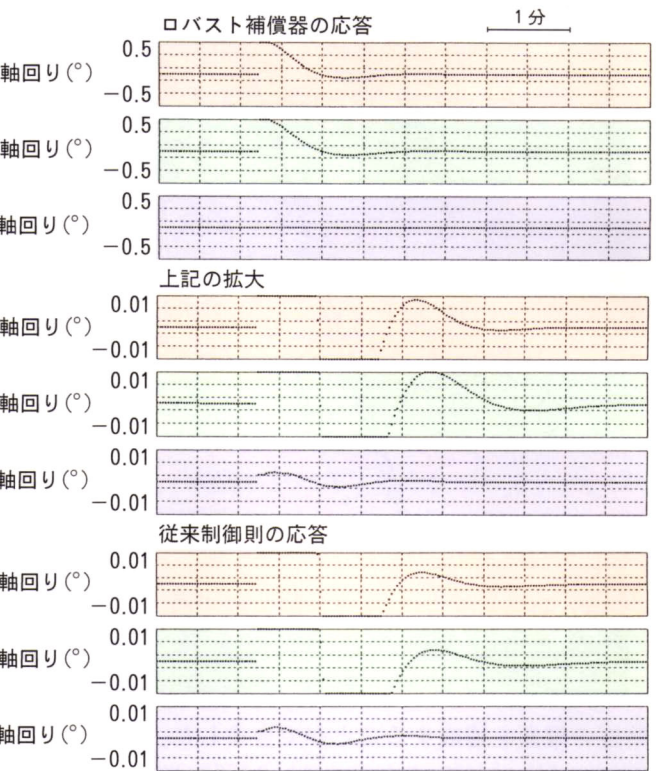


「はるか」の姿勢制御

「はるか」の姿勢制御系は、ミッション実現のためにいくつかの新しい技術を使っています。ロケットにより投入された軌道から観測に適した軌道まで上昇する軌道制御機能、大型アンテナを目標の天体に誤差 0.01° 以内で向ける姿勢制御精度、そして多くの天体を効率的に観測するための姿勢変更機能などです。これらの目的を達成するため、下図のような機器構成になっています。

「はるか」は、宇宙研の衛星としては初めてゼロモーメント3軸制御方式を採用しました。従来のスピン安定方式やバイアス安定の3軸制御方式では、一部の機器が故障しても角運動量保存の法則に従って太陽電池パネルが太陽方向を自然と向き続け、衛星を安全な姿勢に維持するように設計することができます。しかし、「はるか」の場合は、姿勢制御精度の点でスピン安定方式は不可能、バイアス安定方式では巨大なモーメントホイールが必要になり重量的に不利であることから、制御方式はゼロモーメント方式として、何が起こっても衛星を安全に保つ制御系が必須となりました。

しかし、限られた重量やコストの中で制御系を構成するためには、全ての装置を冗長にして多数決をとるようなわけにはいきません。そこで、従来からの衛星運用の経験をふまえて、衛星がなんらかの異常を検出

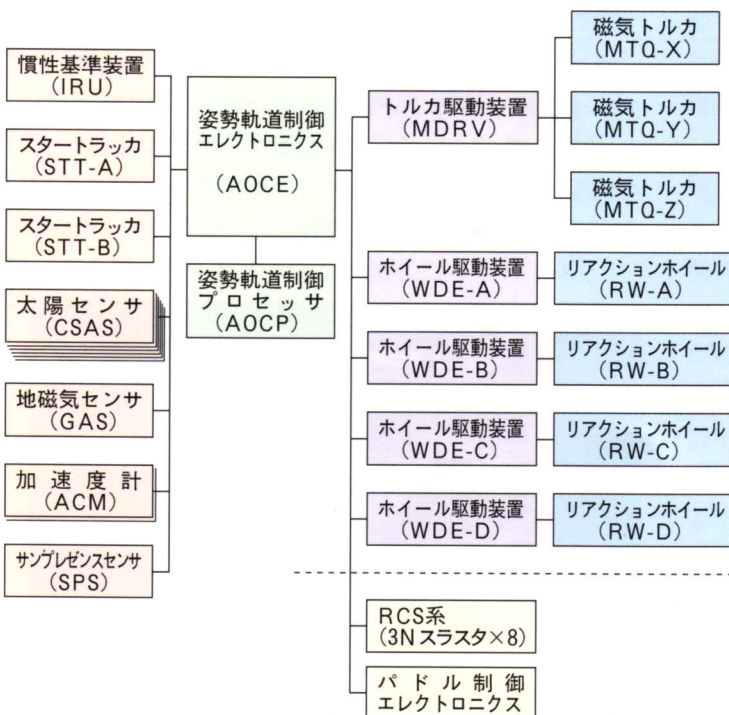


したら自動的に定常観測を中断してセーフホールドモード（スピン安定型の制御）へ移行し、地上での人間の判断を待って再立ち上げをするという方策をとっています。

初期運用においては、ロケットから分離されて後、地上からの支援無しにスピンドアウン、太陽指向、太陽電池パネル展開を全て自動で行う必要がありました。最初に鹿児島局で衛星からの電波を受信するまでは、担当者一同、大変ドキドキしていました。残念ながら不安が的中してしまい、一部のコマンド設定に不適切な部分があったため、衛星の姿勢が予定とは異なる状態で最初の衛星受信時間を迎えてしまいました。直後の運用により無事回復できて、ホッとした次第です。

その後の近地点上昇軌道制御は無事終了し、次の山場は大型観測アンテナの展開でした。大型アンテナの話は別項で述べられますが、姿勢制御担当としては、衛星の形が軌道上で大きく変わってしまうわけですから、理論的には姿勢制御上の問題はないとわかっていながら、大変緊張しました。

「はるか」の姿勢制御系の設計にあたって注意したことは、観測アンテナ、太陽電池パネルといった大型の構造物が付いているということです。このような構造物は柔軟性を示すために、衛星を制



姿勢制御系の機器構成

御しようとするとう振動が発生し、うまくいかないことがあります。そのため「はるか」では、基本的には振動を起こさないようにゆっくりと姿勢を動かすと言う方針をとりました。しかし、一方であまりゆっくりしか姿勢が動かせないと天体観測の効率が悪くなりますので、計算の上、ぎりぎりの速さに設定しました。さらに、実験的に、ロバストフィルタと呼ばれる外乱推定ロジックを追加して、さらなる性能向上の試験をしました。前ページ上図は軌道上での実験結果です。従

来方式より、若干ではありますが、姿勢の静定が早くなっています。柔軟構造物を有する衛星の制御については、多くの研究者がさらに進んだ研究を行っています。しかし、「はるか」の場合はまず安全性を第一に考え、基本的には古典的な制御方法で、追加機能としてロバストフィルタを付けるという方式にしたため、華々しい違いは出ていません。これも実ミッションを成功させながら地道に技術を積み重ねていく工学実験の宿命だと思います。（橋本樹明）

軌道を決める

「はるか」は、打ち上げ後、近地点高度を上げる軌道制御が3回にわたって施され、近地点高度約560km、遠地点高度約22,000km、軌道周期約6.4時間の地球周回楕円軌道に達した後、遙か彼方の電波星のスペースVLBI観測を行っています。VLBIの観測では観測を行う複数の観測局の位置・速度を高い精度で知っていませんと、各々の観測局で観測した電波の波面を合わせることができず、天体の画像を合成できません。このため、「はるか」が行うスペースVLBIの観測では衛星自身の位置・速度を高精度で決定する軌道決定が観測の成否を決める重要な要素となります。

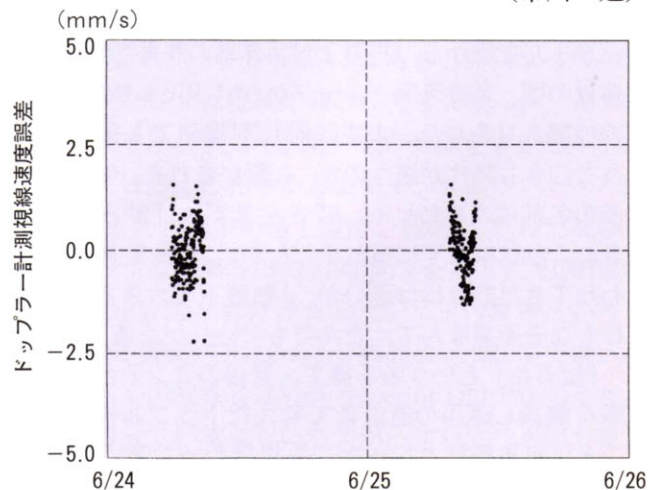
軌道決定は地上局－衛星間通信におけるレンジ（測距）・ドップラー（距離変化率）のデータを用いて行われます。「はるか」では、従来の衛星と同様に鹿児島局でS帯（2GHz）によるレンジ・ドップラーデータを取得する他に、臼田局で10mアンテナによる新方式のKu帯（15GHz）の高精度ドップラーデータを取得しています。更にVLBI観測の国際協力として、米国のジェット推進研究所（JPL）のDSN（Deep Space Network）の3受信局、および国立電波天文台（NRAO）のグリーンバンク局でKu帯のドップラー観測が行われています。これらのデータが宇宙研とJPLの研究者により精度に関する解析・評価に用いられています。

軌道決定の精度は観測データの計測精度に依存しています。その誤差要因としては、取得する受信局の位置、データを取得するための計測装置の分解能、計測装置で用いる時計の精度等があります。これに軌道決定する際の軌道運動、レンジ、ドップラーの観測モデルによる誤差成分が加わります。軌道決定結果は、右図に示したような、観測値と計算値の差などで評価できます。理想的には観測値にノイズがなければこれらの差は零の線上にきます。しかし、実際にはノイズ成分に加え非線形な量が含まれているため完全に零とすることはできません。臼田局のドップラー計測による

視線速度の精度は図からも判るように、毎秒2.3mm（局－衛星間往復）程度、DSN局は毎秒1.1mm（局－衛星間往復）程度、鹿児島局のドップラーは毎秒約3mm（局－衛星間往復）であり、レンジ計測による距離の誤差は約5m程度です。これらのデータを用いた軌道決定精度は、軌道11周回中の2回の受信時間帯のデータを用いるとき、位置にして200m～500m、速度で毎秒1～3cmとなります。

「はるか」では、正確に天球上の位置が判っている電波星を用いたVLBI観測自身によって、軌道決定で決められた衛星の位置・速度にどの程度誤差があったかを逆に評価できます。言い替えれば、レンジ、ドップラーという受信局－衛星間の視線方向の観測データにVLBI観測によって得られた電波到達遅延時間を加えることで精度を向上させることができます。軌道決定の応用として、このVLBI観測による情報を加える研究が進められており、宇宙研でも将来の惑星探査機の軌道決定等に应用される貴重な実験になることでしょう。工学実験として軌道決定精度のゴールはどこに？ということとは常につきまとう課題といえます。

（市川 勉）



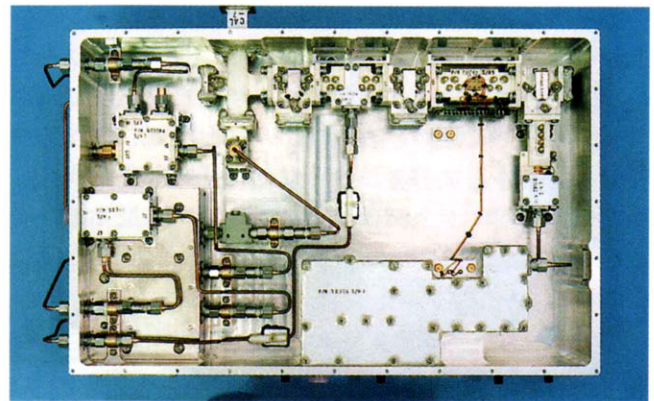
VLBIのための観測システム

「はるか」はスペースVLBI観測のための基礎的な工学実験と実際の観測を目的とした衛星です。このスペースVLBI観測を行うためには地上の電波望遠鏡とおなじように、大型アンテナで天体からの電波を受信し、その波の情報を記録しなければいけません。地上の電波望遠鏡では高速のデータレコーダでテープに波の情報を記録し、後ほど複数の望遠鏡で取得したテープを持ち寄り、処理して画像を得る事ができます。ところが、「はるか」ではこのような高速のデータレコーダが載せられませんし、載せたとしても記録したテープを我々の手に送る手段がありません。

そこで、「はるか」は、観測した天体からの電波をデジタルデータに変換して、地上の衛星受信局にそのデータを直接送信し、それを磁気テープに記録します。このデータの送信には1秒間に1億2800万ビット（128 Mbps）と、宇宙研の衛星の中では最も高い伝送レートが必要になりました。

また、VLBI観測で複数の観測局が観測した電波の波面を合わせ画像を得るためには、観測データに対して非常に高精度な時刻をつける必要があります。地上の電波望遠鏡では高精度の原子時計を用い、高精度な時刻付けをするのですが、「はるか」では原子時計を衛星に搭載することはせずに、地上受信局の原子時計で作られた基準信号を衛星に送ることにしています。

天体から来る電波は非常に微弱で、「はるか」の8mのアンテナで受信しても信号は 10^{-26} Wにしかありません。それに雑音をなるべく加えないように増幅しなければなりません。「はるか」では、1.6GHz帯と5GHz帯と22GHz帯の3つの周波数帯を受信していますので、3つの周波数帯の低雑音増幅器を搭載しています。それぞれの信号は、地上リンク局から送られた基準信号



をもとに周波数変換され、高速でデジタル信号に変換されます。これを15GHz帯の電波を使って地上の衛星受信局に伝送します。また観測システムの性能を把握するために必要となる参照信号は衛星上で作っています。写真はその参照信号を生成する機器です。衛星の環境ではこの機器の温度は -20°C から $+30^{\circ}\text{C}$ くらいまで変わります。また打ち上げの際には、たいへん大きな振動が加わります。この機器は大変精密なもので、このような状況でも参照信号を正しく発生するように何度も温度試験や振動試験が繰り返されました。他の搭載機器も同様な試験を経ています。

打ち上げ後の初期試験では残念ながら22GHz帯で大きな損失が発生していることが分かり、試験観測以外の通常の観測を行うことはできませんでした。しかし、1.6GHz帯と5GHz帯では期待した観測性能を達成することができました。宇宙の電波望遠鏡と地上の電波望遠鏡を結ぶというスペースVLBI観測の実証実験を行った後に、全世界から観測提案を受け付けた共同利用観測やプロジェクト観測で大きな成果を日々あげています。（小林秀行）

ひよんな縁から、打ち上げ半年前の熱真空試験真っ盛りの頃、X線天文グループからMUSES-Bグループの仲間入りをした。まずは同じ宇宙研でも衛星が違うところも文化が違うのか、と驚かされた。VSOP計画の名前にふさわしく、皆さんまずは「飲み」が好き。これにはすぐに慣れましたが……。長年真摯に携わってきた方々には悪いが、「軌道上で大きさが何倍にもなる衛星なんて、とんでもない」が正直な感想。

「はるか」という名を得て、緊張のアンテナ展開。散々議論し運用の直前まで考えたトラブル時のコマンドは無事無駄となった。長年携わった方々の歓喜の横で、新参者はクールにとにかくホッとした。と

んでもない衛星はとんでもないことをやった、と。

そしてスペースVLBIの基礎実験、ここまで来ればイケイケどんどん、と思った矢先の予期せぬトラブル。3日間ほぼ徹夜の作業で脳の血管の一本一本がはっきり分かった。時に激しい議論もしたが衛星を助ける事に皆で結束し、衛星状態を示す数字に皆で一喜一憂した。無事衛星が回復した後、フリッジが出たとの報に、新参者はまたもホッとした。

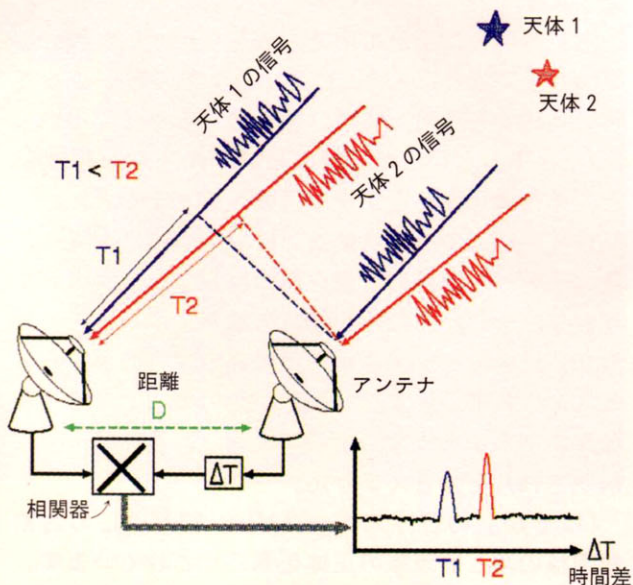
横柄な新参者を暖かく向かい入れ、無理難題をものともせずにこなして頂いた所内外の関係者に感謝したい。色々ありましたが、「はるか」はしぶとく元気で、こうして成果を上げています、と。（紀伊恒男）

干渉計／VLBI／VSOP

望遠鏡は口径の大きな物ほどよく見える、つまり解像度が高い、と言うことは皆さん直感的に分かっているでしょう。「倍率を上げればどんな望遠鏡でもいいじゃない」と言う声が出てきそうですが、実はどんなに倍率を上げて、口径の大きさによって解像度の限界が決まってしまう。望遠鏡は大きい方が良い。これは「光」＝電波、可視光などあらゆる電磁波という意味で一が波であるという性質によるものです。

1946年に、『電波干渉計』が実現されてから、電波天文学者は、無理に大きな望遠鏡を作らなくても、並の大きさの望遠鏡を集めて大きな望遠鏡に匹敵する解像度を持った望遠鏡を作れることを実証しました。普通の電波望遠鏡は、鏡やレンズを使って天体からの電波を曲げて、1個所に電波を集めてから受信します。干渉計の場合は、複数の並の望遠鏡で集めた電波を信号線で1個所に集めて受信します。

簡単のため、2つのアンテナを組み合わせた干渉計を考えます。この時に天体が、どちらの方向から電波を出しているかによって、それぞれのアンテナへの電波の波の到達時間が変わります。2つのアンテナで観測された波がピッタリ重なる（干渉する、相関する）ときの時間差を測定してやることによって、その天体がどちらの方向にあるかを知ることができます。『相関器』というのは、この電波の信号が重なる時刻を測定する装置であるとも言えます。点電波源が2つある場合は、それぞれの電波源の方向に対応するところに2つピークがたちます。このとき生じる2つのピークの時間差は、この2つの天体が離れるほど大きくなり、また、2つのアンテナの間隔が広くなれば大きくなり



ます。この時間差をどれくらい精密に計れるかは（電波が波の性質を持つことによる）限界がありますから、2つのアンテナの間隔が大きいと、この2つの点電波源の間隔が細かく計れることになります。この2つの点の電波源をどのくらい細かく計れるかが「解像度」です。つまり、2つのアンテナを離せばそれだけ解像度を上げることができます。

1967年には、遠く離れた2つのアンテナを信号線で結ぶ代わりに、高精度の時刻基準装置とデータレコーダを使い、1つの電波干渉計とすることに成功しました。それまでは望遠鏡を信号線で結び、そのまま受信したデータを相関器で処理をしていました。この実験では、その代わりに遠く離れたアンテナで受信した信号をそれぞれ高精度の時刻をつけてテープに記録し、その記録テープを持ち寄って再生する事で相関器の処理を後回しにしたのです。これがVLBIです。VLBIというのは、Very Long Baseline Interferometerの略で、直訳すると「超長基線干渉計」となります。

VLBIの成功により、アンテナの間隔を一気に約12,000kmまで伸ばすことに成功しました。この結果、それまで電波の解像度は10秒角（約400分の1度）であったものが、10ミリ秒角（40万分の1度）以下と3桁以上も改善されました。その解像度によって、活動銀河のジェットが、1000倍のスケールで同じ形をしていること、ジェットの動きが見かけ上光速を越えるように見えること、などが発見されました。しかし、地球上ではこれ以上アンテナを離すことはできません。なぜならば、12,000kmというのは、地球の直径であったからです。あとは、地球の外にアンテナを置くしかありません。こうして、高い解像度を求めて、電波望遠鏡を地球の外の宇宙に持ってVLBI観測する、スペースVLBIのプロジェクトが考案されました。

「はるか」は、人類が打ち上げた初めてのスペースVLBI衛星です。もちろん、「はるか」の持つ一つの電波望遠鏡だけでは電波干渉計はできません。一緒に観測する相手が必要です。質の良い観測をするためには、できるだけ多くの相手が必要です。日本のグループは、「はるか」と世界中の地上電波望遠鏡、そしてその信号を処理する世界各国の相関器、を使ったVLBI観測を、VSOP観測と名付けました。このVSOPというのは、VLBI Space Observatory Programmeの略です。確かに、多くの関係者はVery Superior Old Paleのお世話に随分なっているらしいですが、決してこの略ではありません。

（村田泰宏）

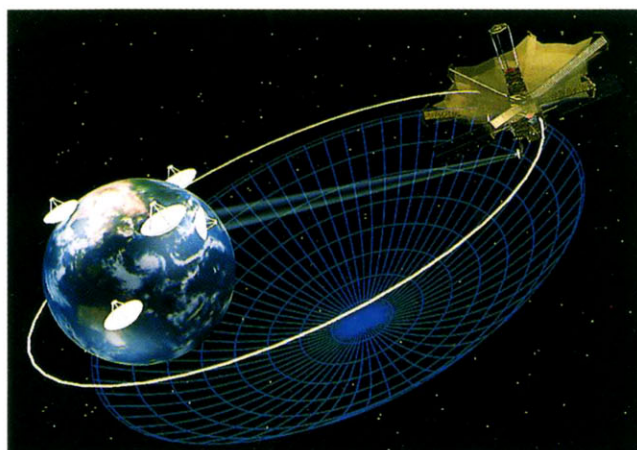
VSOPミッションとその成果

解像度で圧倒するVSOP国際マシーン

「はるか」と地球上のアンテナ群とを組み合わせ、最長3万kmのVSOPの瞳は、1609年のガリレオの望遠鏡の十億倍、人の瞳の百億倍です。電波天文衛星「はるか」は、VSOP計画の名のもとに大規模な国際協力を展開し、波長18cmと6cmで、連日の観測を続けています。得られる画像の解像度は、波長18cmで0.001秒角（約4百万分の1度）、波長6cmで0.0003秒角（約百万分の1度）を達成しています。ハッブル宇宙望遠鏡の解像度が最高で0.05秒角なので、波長6cmでは150倍の解像度、あるいは、ハッブル画像の1ピクセルを2万2千ピクセルに分解する圧倒的な解像度です。

スペースVLBI特有の事として、「はるか」専用の衛星受信局網が、世界の5カ所に作られました。公開科学観測に参加する地上の電波望遠鏡は34局、アンテナ数にして88基が、スケジュールに従って参加します。全部同時に観測に参加するわけではありませんが、地上の電波望遠鏡17局が参加した例では、見事な映像が得られています。一つの局からみると、10パーセント前後の時間参加率です。

このような科学観測には国際的な連携が欠かせません。VSOP計画では、科学運用の方針を決める国際委員会VISC（VSOP International Science Council）を作っています。また、実行作業グループVSOG（VSOP Science Operation Group）を設け、宇宙科学研究所、国立天文台、等の研究者が中心となって、観測のスケジュール管理、ユーザーサポート、衛星運用、相関局



運用、各国の地上望遠鏡との対応等、幅広い科学運用をおこなっています。

各国の多くの機関や天文台と協力したこのような複雑な国際プロジェクトは、誰も経験した事のない試みでしたが、10年にも及ぶ準備と打ち上げ後の努力によって、新しいタイプの宇宙規模の観測装置が実現しました。初めての地上でのVLBI観測が成功したのが1967年、それから30年の進歩によって、スペースVLBIが、今世紀中に実現できたのです。

VSOPの科学

銀河のなかには、その中心で激しい活動をおこしているものがあります。このような天体を『活動銀河核』と呼びます。中心はまばゆく輝き、そこからは激しくジェットが吹き出しています。中心に潜む巨大ブラックホールに落ち込む渦が、舞台を提供して、高エネルギー

★『活動銀河核』とは

この特集号で紹介する「はるか」によるスペースVLBI観測の主要な観測対象は『活動銀河核』と呼ばれる天体です。宇宙には我々の太陽系が属している銀河系と同様な大規模な星の集団、「銀河」が多数存在しています。銀河の中には、その中心部の小さな領域が異常に明るく光るものがあります。その大きさは数～数十光年以下であるにもかかわらず、その明るさは太陽の明るさの十億～数兆倍と銀河全体の明るさに匹敵、あるいはそれ以上にも達します。太陽系から最も近い恒星までの距離が数光年であることを考えれば、その異常さが分かるでしょう。この異常に明るい銀河中心部の天体を『活動銀河核』と呼びます。よくその名前が知られている『クエーサー』は十億光年よりも遠方の最も明るい活動銀河核の仲間であり、あまりにも明るいためその母体で

ある銀河がなかなか観測ができず、星の様に点状に見えます。

活動銀河核は宇宙の中でも最も激しい現象であり、電波から可視光、X線、ガンマ線までのあらゆる波長の電磁波を放射します。激しい明るさの変化や、『ジェット』といった非常に高エネルギーな現象など、その激しさを示す現象は多々あります。

現在の研究では、活動銀河核の中心には太陽の質量の千万～百億倍の質量を持つ巨大ブラックホールがあり、そこに流れ込む物質の重力エネルギーの解放が、その激しくエネルギーの高い現象の源であると考えられています。しかし、その中心でどのような高エネルギー現象が生じているかは現在も十分に解明されたとは言えません。

「はるか」の行うスペースVLBI観測はこの活動銀河核の激しい現象の正体を暴こうとしています。

★ジェット

方向性のよい物の流れを一般にジェットといいます。宇宙には、そのような物の流れがたくさん観測されています。一般的に、星や銀河は回転しており、軸対象の構造をしているものがほとんどで、活動性の高い銀河や星からは、その軸方向にジェットが観測されます。この特集号でジェットと呼ばれているものは、銀河円盤の軸方向に上下に吹き出すガスの流れです。ガスの成分は、プラズマと呼ばれる、負

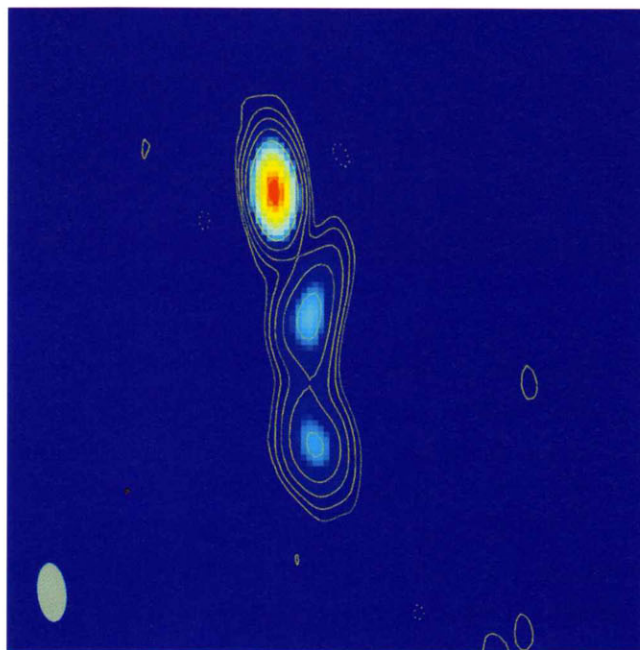
の電荷をもつ電子と正の電荷をもつ物質（陽子または陽電子）の混合ガスで、ほとんどの場合、光の速度の数10%から、99.99... %（秒速 数十万km）と非常に高速です。観測結果のいくつかは、団子状であったり、丸かったりで、ジェット状には見えませんが、ジェットの見え方は、その回りにある物質の分布や、進み方（曲がりかた）によって、一部分のみ強く見える場合があります。何も見えないところでも、ジェットがあると考える場合もあります。

ギー粒子の加速、ジェットの生成をしているようです。1960年代に発見され、天文学上の大きな謎とされてきた『クェーサー』はこのような天体の最も活動的なもので、何億光年、何十億光年もの遠くの銀河の中心で最も激しい活動を起こしている天体です。しかし、活動の源は太陽系程度の大きさの（宇宙から見れば）非常に小さな領域にあるため見かけの大きさが小さく、星のように見えています。このような明るく、しかし非常に小さな天体の撮像観測は、VSOPが最も得意とするところです。

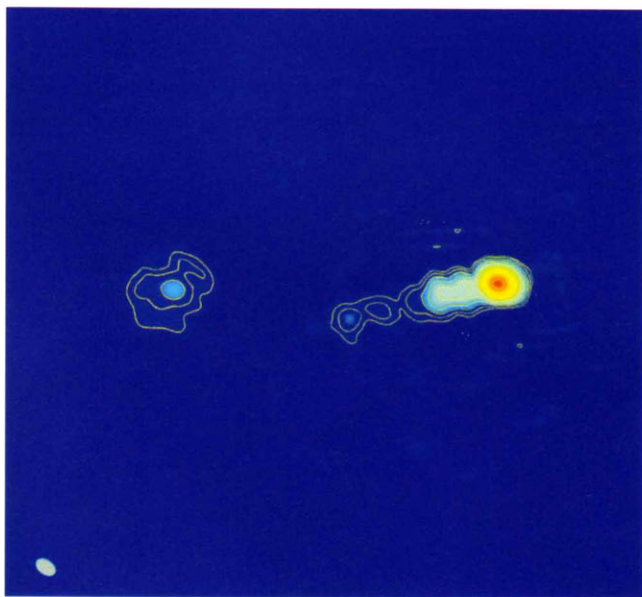
VSOPでは、運用時間の約半分をさまざまな天体の公開観測に、約4分の1をミッション主導の系統的なサーベイに向けています。すでに300を超える観測がこなわれました。以下、科学成果の例が、チームの仲間によって紹介されますが、そこで触れられないトピックをいくつか紹介します。あわせて、VSOP全体の科学像を理解していただけると幸いです。

宇宙スケールの遠方のクェーサー像

強力な電波天体では、宇宙論的な遠方からの電波が



136億光年遠方のクェーサー0014+813。

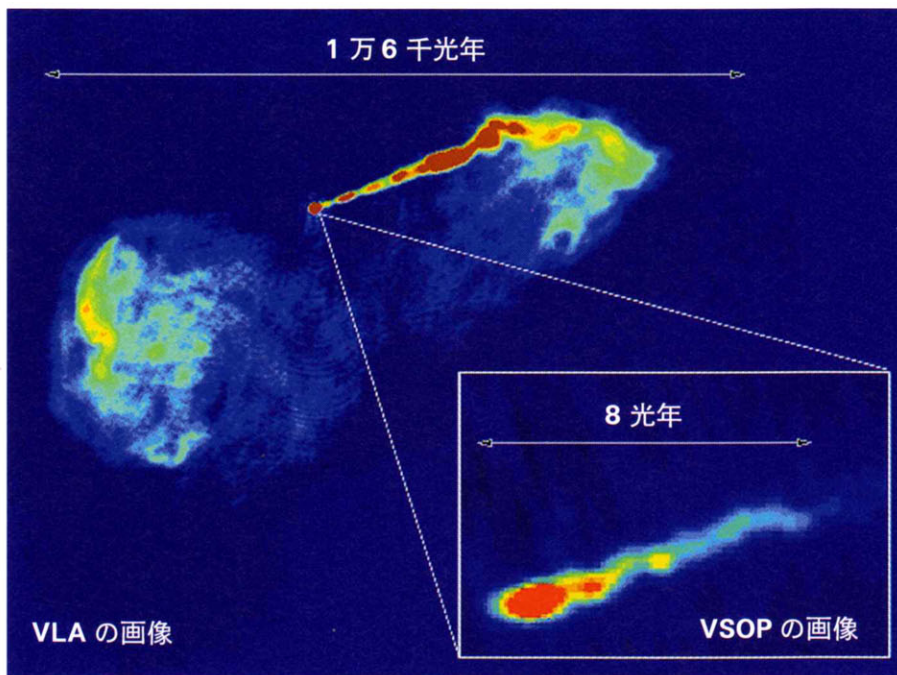


120億光年遠方のクェーサー0212+735の姿。右の核から左に向かって135光年にわたってジェットのように飛び出している。

とどきます。VSOPでは、超遠方で輝く、このようなクェーサーをいくつも撮像しています。宇宙の始まりであるビッグバンから現在までの時間のうち、ビッグバンからまだ1,2割の時間しかたっていない遠い昔の、言い替えれば、そんな遠方の天体は、ハッブル宇宙望遠鏡や「すばる」望遠鏡でもとらえられていますが、VSOPでは、こんな時期の天体をリアルに映像化しています。

M87中心核の螺旋状の宇宙ジェット、そしてブラックホールに迫る

近い天体の観測からは、その天体の細部の構造が分かります。乙女座の方向、約5千万光年の近(!)距離の銀河群中心部に、楕円銀河M87があります。M87では可視光や電波で観測される数千光年にもわたる細い直線的なジェットが注目されてきました。アメリカの電波望遠鏡VLA（Very Large Array）の波長90cmで観測した画像では、さしわたし40万光年にわたる、さらに大きな領域で電波が周辺に蔓延している事が分かっ



楕円銀河M87の中心部のVSOP映像。

ています。VLAで観測したような波長の長い電波は、電磁波を放射して徐々にエネルギーを失った太古の電子によるもの、すなわち、過去の活動の名残です。また、ハッブル宇宙望遠鏡によるM87中心部の可視光のスペクトル観測から、中心付近のガス雲はジェットの方法を軸として回転していることがわかり、その回転速度から中心付近には太陽の24億倍の重さの質量が集中すると言われています。これは中心に巨大ブラックホールが存在する証拠だと考えられ、そのシュワルツシルド半径（ブラックホールの半径）は太陽系程度の大きさにあたる70億kmと推定されます。

「はるか」とVLBA（アメリカ8000kmに散在する25mアンテナ10局）は、M87のジェットの付け根を、

★波長と周波数

電波や光（可視光）、そのほかにレントゲンで使うX線や日焼けの原因の紫外線、こたつを出す赤外線、あとは記事のなかにあるガンマ線。これらは全て、電磁波とよばれる、電場と磁場が振動して伝わる波の仲間です。その違いは波の山と山の間隔で、この間隔の長さを波長といいます。境界ははっきりと決まっていませんが、波長が0.1ミリメートルより長い電磁波を電波、それよりも短く1マイクロメートル（千分の1ミリ）より長い電磁波が赤外線、そこから波長が短くなるにつれて（可視）光、紫外線、X線、ガンマ線と名前を変えていきます。一方、波を特徴づける量として、周波数があります。これは、振動数とも言われます。これには1秒間に通過

波長18cmで観測しました。観測で得られた画像の解像度は千分の1秒角。これは0.25光年（2兆4千億km）の大きさの構造が見えることに相当し、ブラックホール直径の150倍まで迫っていることになります。

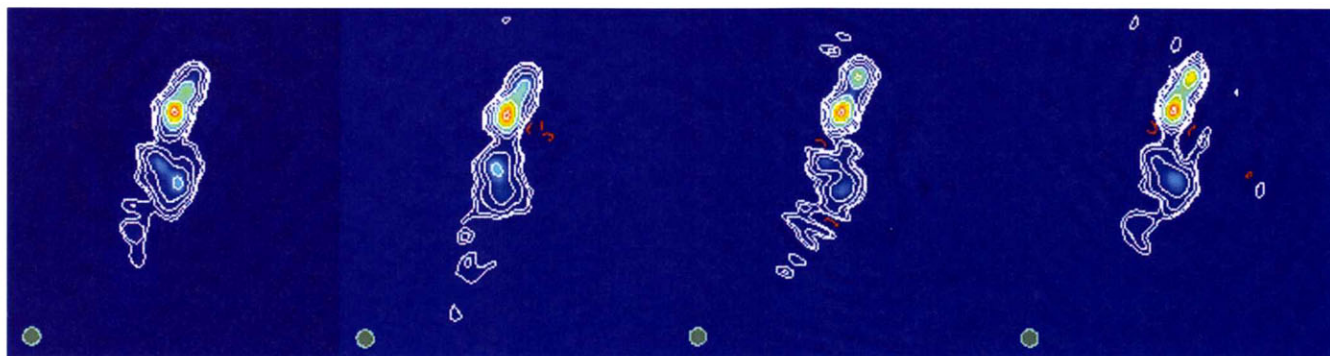
ジェットは緩やかな1光年程度のピッチの螺旋を描いています。中心から離れるに従い、次第に暗くなり、10光年ほど先までこの模様が見て取れます。この緩やかな螺旋がその後ひろがらずに、数千光年にもわたり細い直線的なジェットを作りだしているのは驚きです。これは、巨大ブラックホールに回転しながら落ち込む渦とジェットは磁場を媒介にして相互作用して、加速された高エネルギー電子が磁場に巻きついている姿だと考えられます。

螺旋状の模様が今後どのように移動あるいは変化していくかは、たいへん興味のあるところです。ハッブル宇宙望遠鏡は、ジェットが見かけ上、光速の6倍の速さで外に吹き出しているような構造の変化をとらえています。観測波長6cmでは、更に解像度を3倍あげられます。これによって、ブラックホール直径の50倍の解像度になります。VSOPでは、観測を続けています。

クッキリみえるVSOPでは、姿の変化が追える

VSOPの解像度でみると、時間とともに天体の姿が変わっていくのがみえます。反対に解像度が悪いと、姿が変わっていてもぼんやりしたものがぼんやりして

する波の山の数、ヘルツ（Hz）、を用い数えます。電磁波の伝わる早さは、（厳密に言うと真空中では）常に一定です。したがって、電磁波が1秒間に進む距離30万kmの中にできる波の数を数えれば、それが周波数となります。波長がわかれば、電磁波が1秒間に進む距離を波長で割ることで周波数を求められます。つまり、電磁波を区別するためには、波長か振動数のどちらか1つを言えば十分です。「はるか」の観測波長である、1.3cm、6cm、18cmはそれぞれ、220億Hz、50億Hz、16億Hzですが、十億をあらわす補助単位G（ギガ）を使って、22GHz、5GHz、1.6GHzとあらわします。実際どちらを使うかですが、波長は、電波から紫外線くらいまでの広い範囲で使用されています。周波数は、主に電波で使われます。



クェーサー1928+738の10.5カ月間にわたる4期観測の変化（波長6cm）

みえるだけで、変化が見えません。かくして、解像度のあるVSOPでは、ジェットの様子や形の変化が見えます。見かけ上、光速を超える変化（超光速！）現象が、活動銀河核でも銀河系内天体でも知られていますが、VSOPもこのような変化をとらえています。図に、すでに4回の観測をおこなったクェーサーを示します。

VSOPの高解像データを地上の短波長VLBIデータとつき較べることで、その構造ばかりではなく、ジェットを構成する高エネルギー電子や磁場などの物理的情報をもたらします。この特集号を、是非、最後までお読みいただけますよう。

VSOPの将来

活動銀河核については、更に高エネルギー粒子の加速、ジェット形成と加速、さらには、ブラックホール近傍にも迫らなければなりません。そのためには、更なる解像度が欲しいところです。また、興味ある天体を観測したくても、感度が足りないと観測すらできません。活動銀河核では、短い波長、ミリ波で観測すると、ほんとうの中心まで見やすい事がわかっています。ミリ波で観測すると、同じひろがりの観測システムでも、波長が短くなっただけ細かな解像度が得られます。また、活動銀河核以外にもおもしろい科学が行えます。

例えば銀河系内の光速ジェット現象、超新星爆発、等です。観測波長として、1.3cm, 7mmが重要と多くの人が思っています。アンテナ口径10~15m, 軌道は「はるか」よりほんのちょっと高め、そして受信器は冷凍機で冷やしより低雑音化して感度を上げ、観測バンド巾は1GHz程度とより広くしたい。これで、感度も解像度も、VSOPの10倍が達成されます。M87でいうと、そのブラックホールの大きさの5倍に迫る解像度です。科学と装置の両面をよく考えて、次の現実的なスペースVLBI観測計画を立案しなければなりません。

VSOPの挑戦的な試みにたいして、多くの期待とご心配をうけながら、ここまでやってこれました。それには、方向付け、キックオフからはじまり、現状の複雑なミッションを作り上げ、運用するまでの、多数の献身的な努力が集積されています。ほんとうの初期から現在まで20年ちかく、このミッションを常にあたためかい目でサポートくださっている、電波天文学の草分けの（X線天文学のゴッドファーザー？）小田稔先生のごことは、歴史の長さとともに、感謝をもって言及させていただきます。（平林 久）

★シンクロトロン放射

電荷を持った物質が「加速度」を受けることによって電波をはじめとする電磁波が放射されます。

広い宇宙の中にも磁場の強い領域があります。その強い磁場の中に負の電荷を持った電子が飛び込むと、電子が動くことによって電流が流れることと同じになり、電磁石と同じ原理で電子が磁場として作用し磁場に引っ張られます。しかし、電子は動いていますので、遠心力もあり、結局は磁力線に完全にはくっつかず、磁力線の周りを回ります。

この磁力線の周りを回る電子は磁場のせいで常に加速度を受けていますので、電子は電磁波を放出します。これが、シンクロトロン放射です。電子の数、

エネルギーの大きさや、磁場の強さによって、放出される電磁波の波長分布や強さが変わります。電子はシンクロトロン放射をすることで自分自身の運動エネルギーを減らしていきます。エネルギーの高い電子ほど高いエネルギーの電磁波を出すために、電子の持っている運動エネルギーの減り方が速いです。高エネルギー電子の供給源の中心に近いところでは、供給されたばかりの高いエネルギー電子の割合が大きく、どの波長で見ても明るさは一定です。しかし、ジェットの先の方や、ローブと呼ばれるガスの吹きだまりのところでは、高いエネルギーの電子がなくなり、波長の長い（エネルギーの低い）電波のほうが、波長の短い電波より明るく見えます。

宇宙で最も「明るい」銀河

ここでは、「はるか」で観測された、「明るい」銀河たちを御紹介します。ここでいう「明るい」というのは、単位面積あたりの電波の放射が大きいということと考えて下さい。電球でいえば同じ大きさでもワット数が高いと明るいことを思い浮かべて下さい。

キューサーPKS 1921-293は約40億光年の距離にあり、これまでの電波の観測から、「明るく」、しかもその明るさが短い時間に激しく変化することが分かっていました。この短い時間の明るさの変化は電波を放射する領域が小さいことを示します。地上のVLBIではまだ解像度が十分ではなく、どれほど狭い領域から電波が出ているか、十分に分かりません。「はるか」と地上望遠鏡を使ったVSOP望遠鏡の高い解像度は、その電波がどれほど狭い領域から出ているかを調べるのに世界で一番適しています。つまり、どんなに「明るい」のかよく分かるわけです。「はるか」は米国の電波望遠鏡VLBAと共同して、PKS 1921-293を波長6cmの電波で観測しました。

他の電波が強い活動銀河核と同じように、非常に小さな中心核と広がっているジェットがあることが分かります。この中心核部分の大きさと電波の強さから、PKS 1921-293からやってくる電波が「明るく」、5兆度以上の温度を持った物体から出る電波と同じ「明るさ」であることがわかりました。これは、PKS 1921-293が、今までに人類が観測した天体としては、最も「明るい」天体であることを示しています。

しかし、5兆度以上の温度（「明るさ」）を持った天

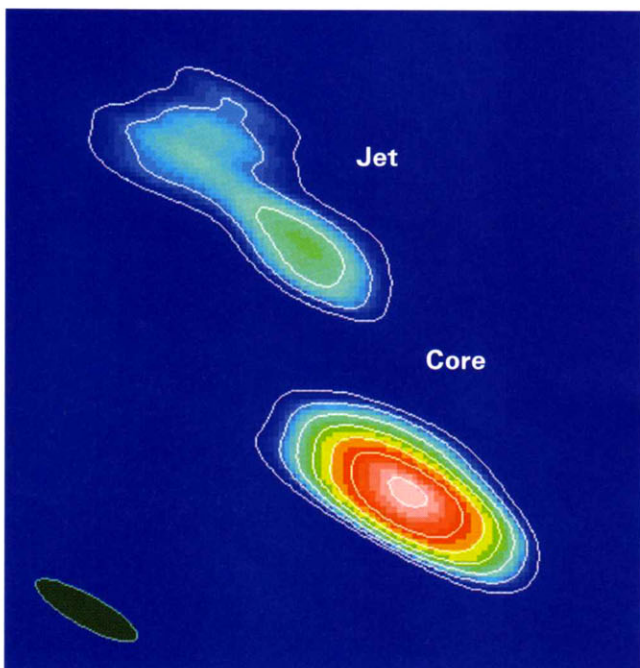
体が存在しているとは考えにくいのです。一般的にキューサーの電波は、強力な磁力線のまわりをまわる高エネルギー電子による『シンクロトロン放射』により生じます。ところが、この放射で1千億から1兆度の温度に相当する「明るさ」になると電波（光）がその領域に充満して、電波（光）と電子が頻繁にぶつかり、『逆コンプトン効果』という現象で電波が短い波長の電磁波に効率良く変わってしまうと予想されています。つまり、電波としてはそれ以上の「明るさ」にならないのです。今回観測された5兆度の温度に相当する「明るさ」の説明には、もうひとひねりいります。

この明るさを説明する有力な説が『相対論的ビーム効果』です。電波を放射している物体がある人から見て光速に近い猛烈な速さで動いているとしましょう。このとき相対性理論の効果によって、止まった人から見ると、電波は等方的ではなく、動いている方向に集められて放射しているように見えます。つまり、物体が観測者の方向に猛烈な速さで動いていると、観測者からは電波が見かけ上「明るく」なったように見えます。PKS 1921-293の電波の「明るさ」は、このようにして説明できます。もし、観測された「明るさ」が1兆度以下の場合は、ほかの説明方法も考えられたのですが、VSOPの観測によって、『相対論的ビーム効果』が実際の天体であることが、はっきり証明できました。キューサーPKS 1921-293の場合、「明るい」中心核は光速に近い速さのジェットの根元と考えられ、中心部にかなり近いところでジェットが十分加速されていると考えねばなりません。

1991年にNASAが打ち上げた『コンプトン・ガンマ線天文衛星』は、約70個の電波の強い活動銀河核から、非常に強いガンマ線の放射を発見しました。ガンマ線の放射には非常に高エネルギーの現象が生じている必要があり、これほど強いガンマ線の放射の発見は多くの研究者に衝撃的でした。この強いガンマ線の放射を出す理由として、一つの有力な説が『相対論的ビーム効果』なのです。しかし、不思議なことに『相対論的ビーム効果』が証明されたPKS 1921-293からはガンマ線は全く観測されていません。

では、ガンマ線の強い放射が発見された活動銀河核を電波で見ると「明るく」見えるのでしょうか？これらの天体では、放射される電磁波の全エネルギーの大半がガンマ線として放射されます。ガンマ線というとつもなく高いエネルギーの電磁波が、一体銀河の中心核からどのようにして放射されるのか。これは銀河中心核の研究の大きなテーマの一つです。

「はるか」では、ガンマ線を放射する活動銀河核を選び、観測しました。PKS1741-038と呼ばれる活動銀

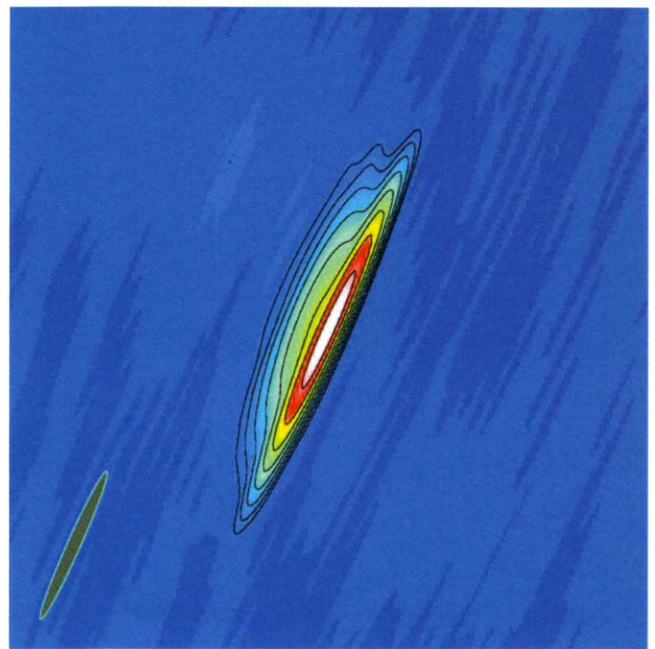


PKS 1921-293の中心核 (Core) とジェット (Jet)。

河核では、およそ9か月の間隔で行った2回の観測で電波源の構造にほとんど変化がなく、一方、7千億度以上に相当する「明るさ」を持つことが分かりました。これは、この天体をジェット運動方向のほぼ真正面から見ているためと考えられます。このことは、ジェットが放出される方向にほぼ沿ってガンマ線が放射されるという理論的な予想を支持しています。また、PKS 1622-297と呼ばれる活動銀河核からは、非常に小さく「明るい」中心核とジェットの構造が見られます。この天体は今から4年ほど前にガンマ線で急激に明るくなっており、この現象に伴ってジェットが出たことが予想されます。これまでの地上のVLBI観測では解像度が不十分でジェットの確認はできませんでしたが、スペースVLBIではじめてジェット成分を見ることができました。

もうひとつ『相対論的ビーム効果』の話題としてBL Lac型天体OT081という天体の観測結果を紹介しましょう。BL Lac型天体は短い時間に明るさが非常に激しく変化する活動銀河核の仲間です。OT081はこのなかでも特に激しい明るさの変化が観測されています。OT081のこれまでの観測ではジェットを鮮明には確認できませんでした。ジェットは長い波長の電波を強く放射します。VSOPの観測では比較的長い波長の電波の高解像度の観測ができます。そして今回、ジェットがはじめて観測されました。

VSOPが観測する5GHzや1.6GHzといった波長の長い電波では、これまでの地上VLBIの解像度の低い画像しか得られず、天体の細かな構造の明るさを計測で

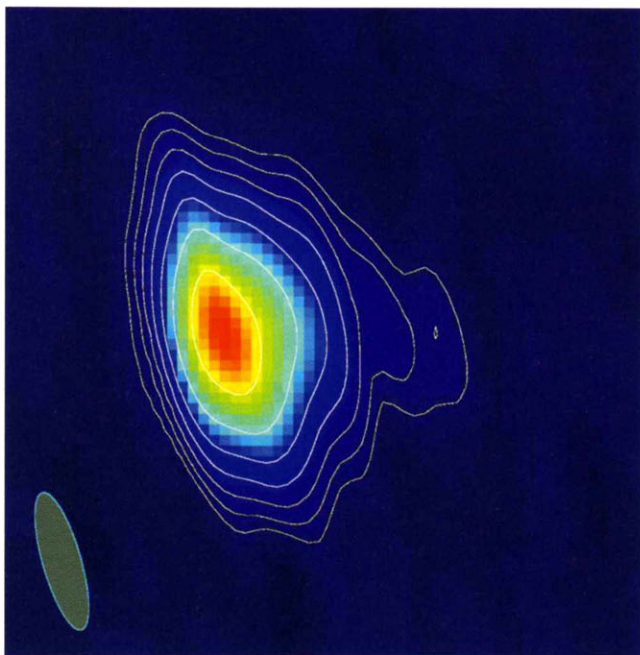


OT081の画像。分解できる像は細長くなっているが、左上方向のふくらみがジェット。

きませんでした。VSOPの波長の長い電波での良質の画像は、波長の短い電波による地上のVLBIの観測と組み合わせると、中心部やジェットの各部分で、明るさが電波の波長によってどのように変わるのか（これをスペクトルと呼びます）、容易に分かるようになりました。スペクトルが分かると、その各部分の物理状態が明らかにでき、天体で起きている現象に迫れます。

OT081では中心核のスペクトルが明らかになったため、その領域の物質の速度を求めることができました。その速度は光速の99.875%以上にもなり、その方向は我々の方向に対して1度以下であることが分かりました。もし、この方向が1度から2.6度に変化すれば、『相対論的ビーム効果』によって、電波の明るさは6分の1程度にも暗くなってしまいます。この特集号でもM87の例で紹介されましたが、これまでのVSOPの観測結果から活動銀河核の中心付近のジェットはらせん状の構造を持つことが数多く観測されています。もし、OT081の中心部でもらせん状のジェットを持っているとすると、ジェットの速度方向の微妙な変化で電波の明るさが激しく変化することも考えられます。BL Lac天体は、ジェットの速度方向が我々の方向と極めて近い、と考えられています。電波の明るさの激しい変化はBL Lac天体自身の激しい変化かもしれませんが、ジェットの速度方向の変化が要因である可能性がありそうです。

(P.G.Edwards, 輪島清昭, 国立天文台・井口 聖)



PKS1622-297の画像。右のふくらみがジェット。

BL Lac天体の偏波観測

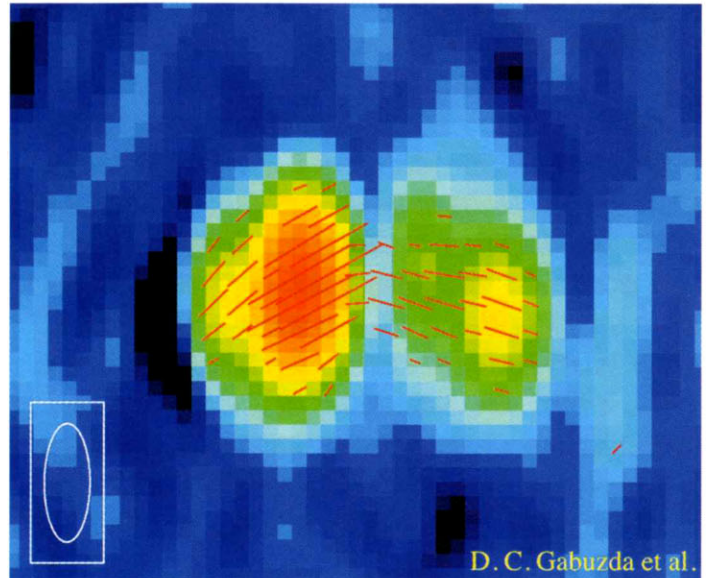
VLBIによる観測は、活動銀河核の巨大ブラックホールから吹き出すジェット、数光年程度の領域が調べられます。ジェットにはいくつかの不思議があります。例えば、ジェットは光速に近い非常に速い速度を持った流れですが、このような速度にどのように加速されるのか。また、そのジェットは数千光年～数万光年という非常に長い距離をあまり拡散せず非常に細いのですが、どのようなメカニズムでジェットを細く閉じこめるか、など。最近では、このような現象には磁場の役割が大きいことが明らかになってきました。

ジェットからの電波は、ジェットを構成する高エネルギー電子と磁場との相互作用によって起こる『シンクロトロン放射』により放射されます。『シンクロトロン放射』は、その場所の磁場の方向に従って電磁波の振動する方向が決まります。この電磁波の振動する方向の偏りを『偏波』と呼びます。つまり、もしジェットから放射される電波の偏波を計れば、ジェットを形成する上で重要な役割を果たす磁場の情報が得られます。

偏波観測を行うにはアンテナに2組の受信機を搭載し、それぞれ左と右の円偏波を受信します。ところが、VLBIでは多数のアンテナを用い観測する必要があり、観測装置により偏波成分がまちまちであったため、VLBIの偏波観測は容易ではありませんでした。それが可能になったのは1990年代の初めで、10年足らずの歴史です。アメリカ国内に同一規格で建設された望遠鏡を用いたVLBI望遠鏡群、VLBAの登場によってその信頼性が向上し、初めてVLBI偏波観測が実用的になりました。

VLBIの偏波観測で分かってきたことは、ジェットの方向に対して磁場の方向は平行、或いは直交しているのいずれか、ということです。平行の場合はジェットの流れに磁場が引きずられている状態、直交の場合はジェットの流れの中に衝撃波が発生し、衝撃波で圧縮された領域が磁場も圧縮されている、と考えられています。この磁場の差異を示したのは、VLBI偏波観測を初期の頃から精力的に行って来た女性天文学者Gabuzdaさんです。彼女は1998年9月中旬から約4ヶ月半の間、国立天文台VSOP室で「はるか」による偏波観測の基礎研究と解析に取り組みました。その成果の一つが活動銀河核1803+784のVSOP偏波観測です。

「はるか」には種々の制約から左円偏波受信機のみが搭載されています。しかし、実験の結果この左円偏波の受信機のみでもVLBAとの共同観測により、偏波の画像が作れることがわかりました。しかも観測結果



電波源1803+784の電波強度と偏波の方向。偏波の向きは短い直線の向きで示しています。磁場の方向は偏波の垂直方向です。

から、これまでの解釈では理解出来ない事実が明らかになりました。

1803+784は、直線的なジェットに対し磁場の向きはほぼ直交しているが場所によってうねっていることが、これまでの観測で分かっていました。「はるか」を用いた高い解像度のVSOP偏波観測は、まずジェットが少しうねっていること、そしてそのジェットのうねりと偏波方向のうねりとが一致することを、明らかにしました。つまり、うねったジェットに常に直交した磁場があることを示します。

先ほども述べましたように、ジェットに直交する磁場はジェットの中に伝わる衝撃波に因るものと考えていました。衝撃波はジェットの局所的な現象です。ですから、もしこの垂直の磁場が衝撃波に因るものであれば、偏波の強さは所々で変化していなければなりません。VSOPの観測ではジェットに沿った偏波の強度変化は非常に滑らかでした。つまり、衝撃波では説明ができません。

しかし、もし磁力線がスプリングのように非常に密にジェットに巻き付いているとすれば、磁場の向きはどこでもジェットの方向に対してほぼ直交します。また、このような構造はジェットを閉じ込めるにも有効であることが分かっています。「はるか」の初めての偏波観測は、偏波観測でジェットの正体を探るのに威力を発揮することを実証しました。今後の発展が楽しみです。

(国立天文台・井上 允)

活動銀河核3C 84のジェットと電波ローブ

電波で明るい活動銀河核の中で、3C 84は距離が約2.6億光年と比較的に近くにあります。VSOPを使えばジェットやその周辺の細かな構造を0.6光年ほどの解像度で明らかにすることができます。そこで「はるか」を用いたVSOPにより周波数5 GHz帯の観測を行いました。また、並行して米国の地上超長基線電波望遠鏡VLBAを用いて周波数15 GHz帯の観測を行いました。この二つの周波数帯でVLBI観測を行うことで、波長の違いによる電波強度の相違、つまり電波の「色」とも呼べるものが分かります。特にこの二つの観測では周波数と基線長の関係から、ほとんど同じ解像度の観測ができますので、両者の観測の比較から容易に電波の「色」付き画像、『電波のカラー画像』とでも呼べるものを作ることが可能となります。このことで天体で起きている現象を一層明らかにできるのです。

3C 84の画像と二つの観測の比較で得られた電波の「色」の分布を図に示しました。可視光では波長の長い（周波数が低い）光が赤く、波長の短い（周波数の高い）光を青く、人間の目では感じます。ここではそれに習って、電波の「色」は5GHzの電波の相対的に明るい時に「赤」、15GHzが明るい時に「青」と表現します（残念ながら、人間の目には何も感じませんが）。

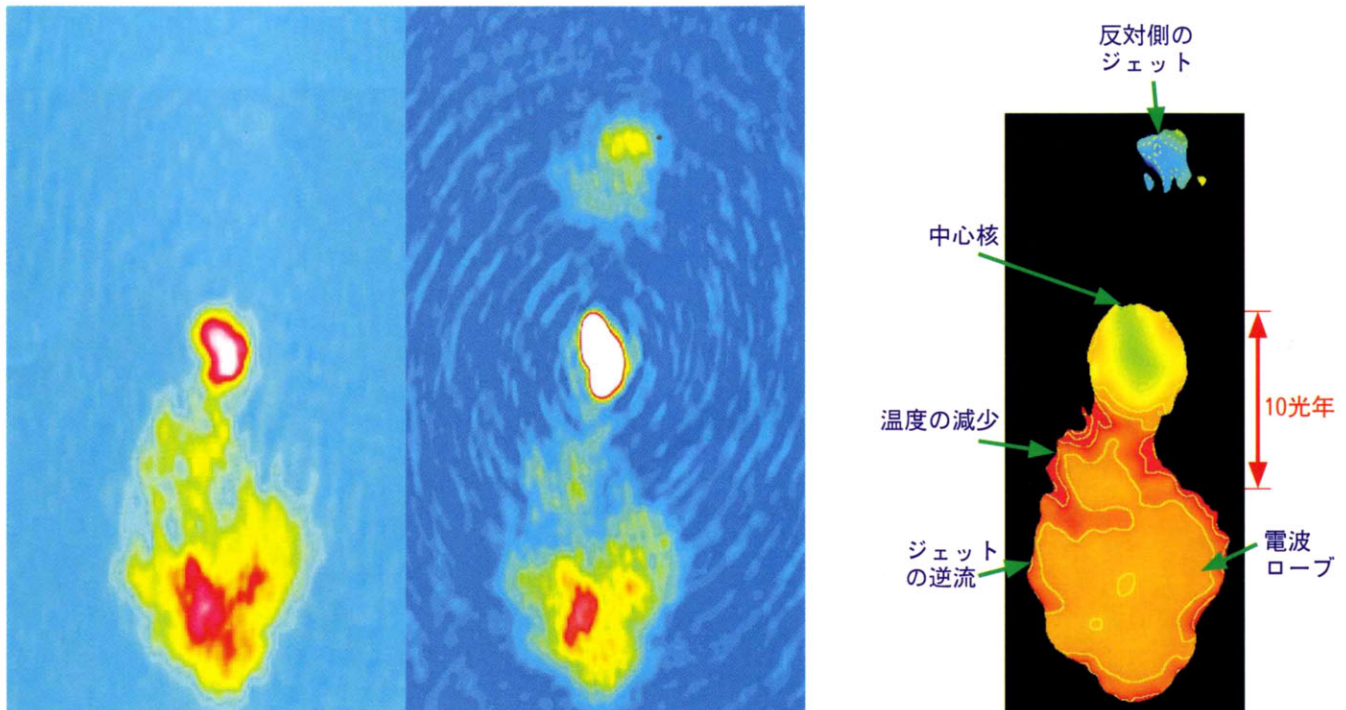
VSOPで観測した5 GHzでは明るい中心核の下側に見えるジェットが二重になっていることがわかります。電波の「色」を示した画像で見ると、中央の明るいジェットでは「色」が下に行くに従い緑から赤に変化してい

るのに対して、左側のジェットでは上に行くに従い黄色から赤に変化しているのが分かります。

ジェットの内部は非常にエネルギーが高い状態にあり、構成している物質の原子は完全にイオンと電子が分かれてしまった状態—これを『プラズマ』と呼びますが—になっています。電波の「色」を見ることでこのプラズマの状態が推定できます。通常、電波の「色」が赤くなる事はプラズマの持っているエネルギーがどんどん失われていくことを示している、と考えられています。つまり、赤くなるに従い、最初にプラズマにエネルギーを与えられてジェットとして吹き出してから時間が経過した、と考えられます。

これを観測した結果に当てはめてみると、中央のジェットは流れが中心核から下側の方向に流れているのに対して、左側のジェットでは逆に下から上側に流れているものと考えることができ、ジェットが逆流しているようなのです。

このような現象は周囲に広がる温度の低いガスに高速なジェットが吹き出した場合に起きると考えられます。高速に吹き出したジェットは進むに従いエネルギーを失い、やがてジェットの圧力が周囲に広がるガスの圧力に負けるとそこでジェットは止まります。そこで、ジェットから供給されるプラズマは周りに広がり「電波ローブ」と呼ばれる構造を作ります（画像のジェットの先端の広がった構造がそれに当たります）。左側のジェット構造はこの電波ローブからプラズマが逆流している現場であると考えられます。

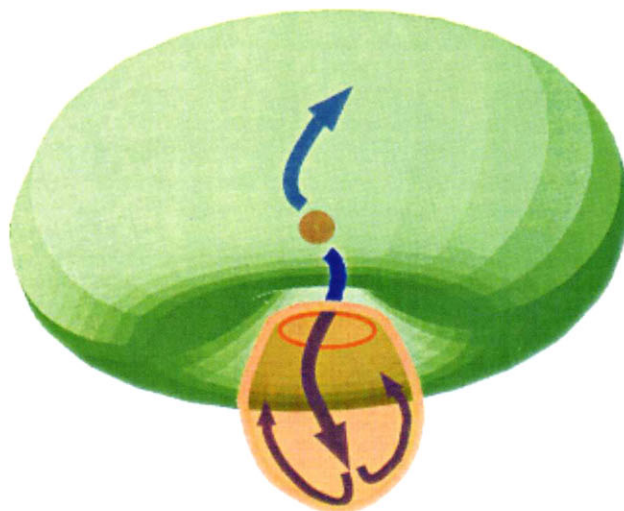


3C 84の電波写真。(左) VSOPによる5 GHzの画像、(中) VLBAによる15 GHzの画像、(右) 二つの観測をもとに作成した電波の「色」の分布。

周囲の温度の低いガスの情報は他にもあります。中心核から上方向に向かっていくジェットを見ますと、青くなっていることが分かります。上側のジェットは我々の方向とは反対側に向かうジェットだと考えられます。青くなるのは、周りの温度の低いガスによってジェットから放射される電波が吸収を受けているものと考えられます。ただし、吸収の様子から、温度の低いガス、と言って相対的に温度が低いだけで、十分高温でプラズマ状態にはなっているようです。つまり、3C84中心核の周りをドーナツ状の低温プラズマのガスが取り巻いているようです。

このようにVSOPの観測で、電波で明るく見えるジェットなどの構造ばかりでなく、活動銀河核の中心部の周辺の構造についても詳細な描像が得られました。

(国立天文台・亀野誠二)



観測から分かった3C 84の想像図。

VSOPサーベイ観測

現在、VSOPの観測時間の約4分の1が、共同利用観測とは別のミッション主導の『サーベイ観測』に当てられています。この観測には地上望遠鏡として日本、オーストラリア、南アフリカ、中国、ヨーロッパ、アメリカなど世界各国から一回の観測に4局ほどが参加して、1天体につき「はるか」1軌道分（約6時間）の波長6センチ（5GHz）の観測を次々に行っていく形で行われます。主要ターゲットは5GHzにおいて最も明るい300個の活動銀河核です。

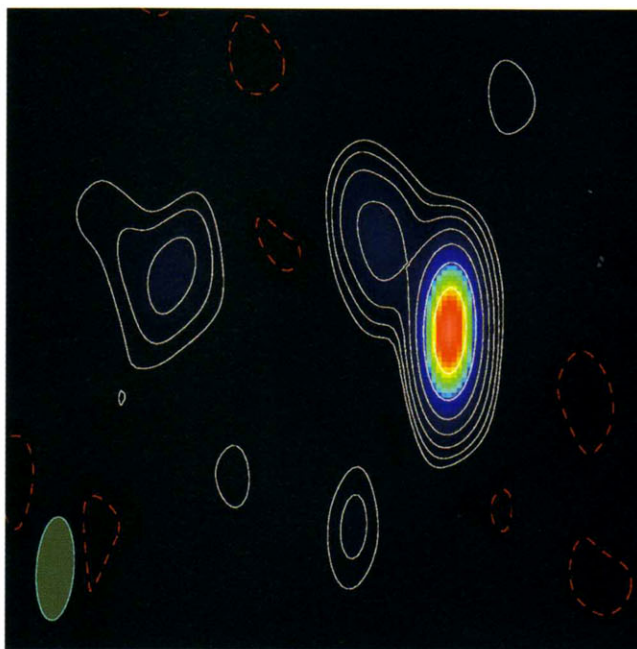
サーベイ観測の主な目的は、1) 最も明るいコンパクト電波天体を他の波長の観測結果と比較して、これらの天体の統計的性質を調査する、2) 今後のより高分解能、高感度の観測のための研究対象として興味ある天体リストを提供する、ことです。「はるか」と地上局がつくるこれまでになく大きなVLBI望遠鏡により、我々がこれまで未知だった解像度の情報（単位面積あたりの明るさ、中心部の大きさなど）が得られます。

これと並行して、オーストリアのATCA電波望遠鏡やアメリカのVLA電波望遠鏡による他の波長の電波強度のモニター、15GHzのアメリカの長基線VLBI（VLBA）のイメージ観測もおこなわれ、各天体の時間による明るさの変化が観測されています。これらの観測と「はるか」のサーベイ観測とを比べることで、同じ解像度で見た波長による電波の明るさの違い（スペクトル）などがわかります。これまでに既に140以上の天体の観測が済みました。一般共同利用観測の一部からも、各々の「はるか」と地上局4局程度分のデー

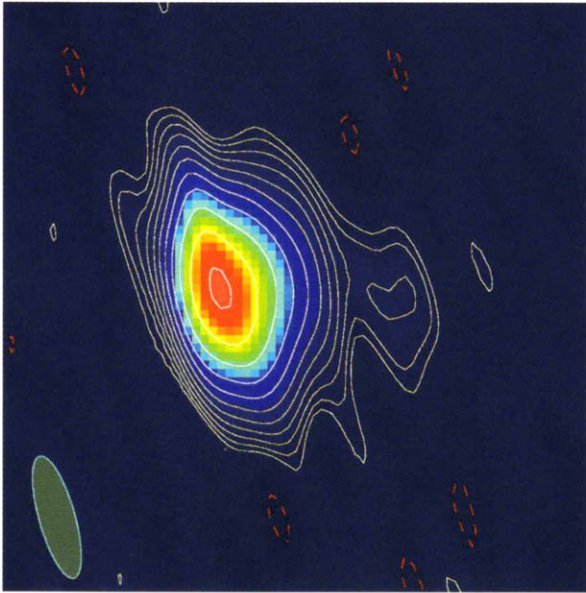
タが抽出され、サーベイ・データとして提供されています。現在データ処理、データ記録の管理体制が整備されつつあり、科学的な結果がどんどん出始めました。図は、すでに観測された「はるか」のサーベイ観測による電波イメージの一部です。

「はるか」打ち上げ以前に、VSOPチームでは141個の活動銀河核に対して系統的な地上VLBI観測を行い、これらの天体がするどく中心に集中する輝きをもっていることがわかっていました。さらに、VSOPで300個のサーベイ観測が続行中です。

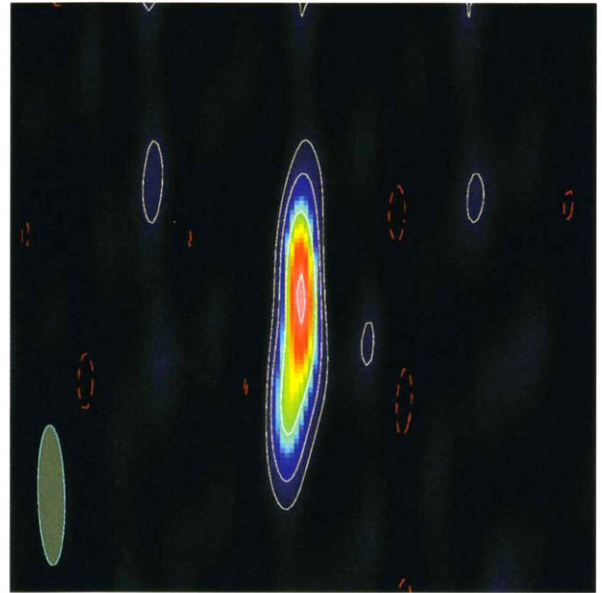
(国立天文台、科学技術振興事業団・堀内真司)



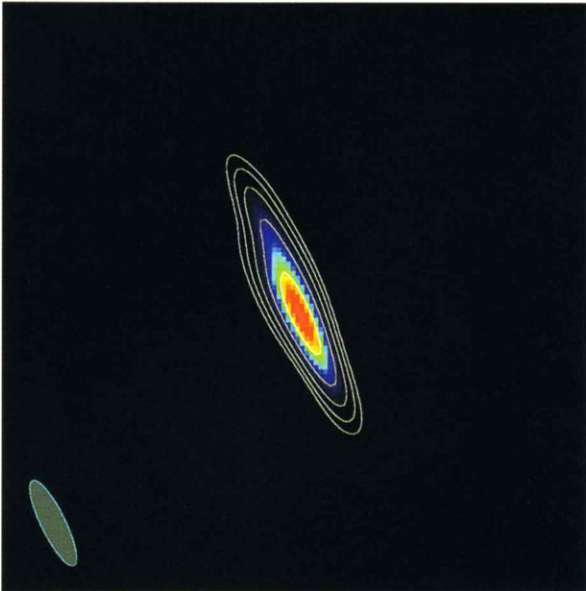
JO609-15



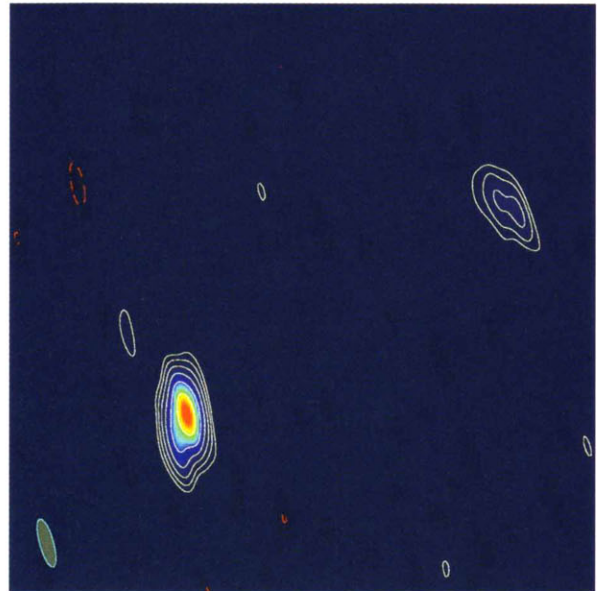
J1626-29



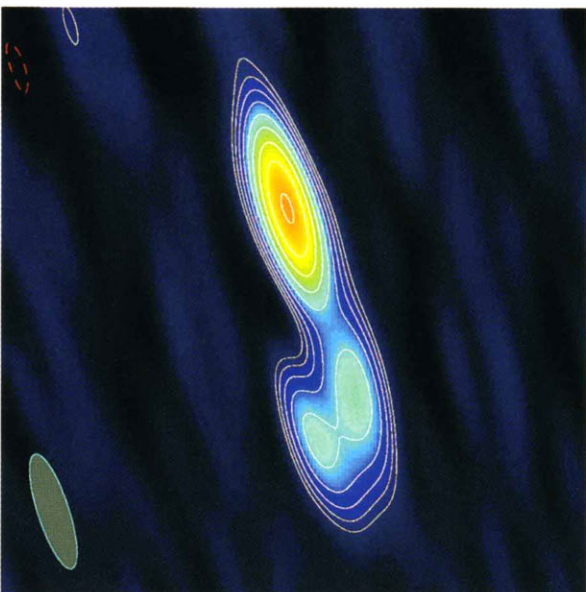
J1517-24



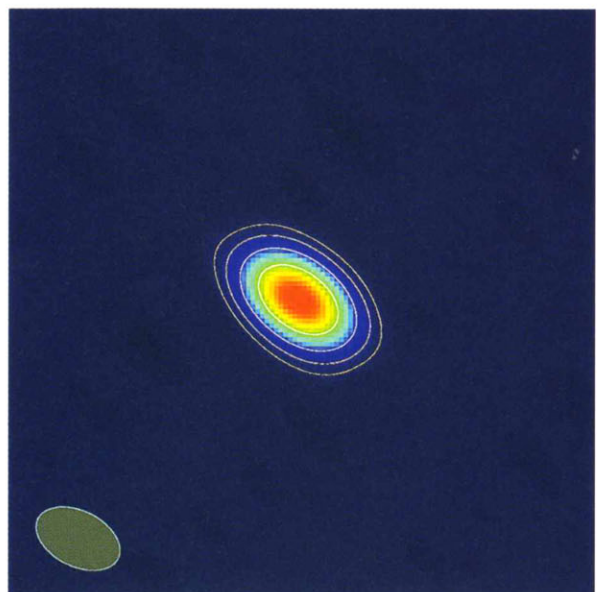
J2011-15



J1658+07



J2207-53



J1035-20

「はるか」による22GHz観測の成功

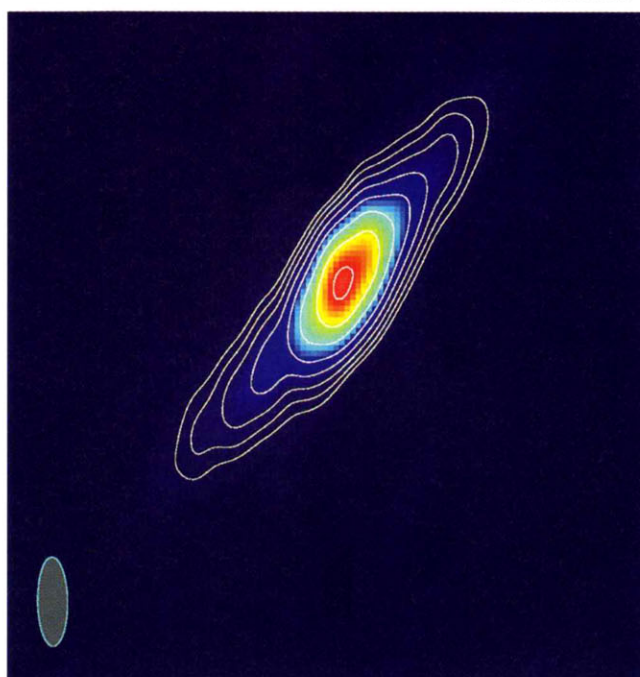
「はるか」は、スペースVLBI観測の技術試験と観測を目的とした衛星です。1998年9月18号のScience誌にその初期成果がまとめられています。そのなかで1.6GHz帯と5GHz帯と22GHz帯の3つの観測周波数帯のうち22GHz帯の観測が成功していないことが述べられています。今回は、この22GHzの観測の『成功』について紹介しましょう。

「はるか」を用いた22GHzでのスペースVLBI観測は世界でもっとも高い解像度を持つ天体の画像の観測が実現でき、100マイクロ秒角（4000万分の1度）の解像度を達成できます。この観測を成功させるためには、たいへん高精度な軌道決定と位相伝送技術が要求されます。衛星の軌道決定の誤差は位置で10m、速度で毎秒5cm程度を達成できました。これは従来の軌道決定精度に比べて格段の精度です。また地上の受信局に設置した高精度時計、水素メーザ発信器、からの基準信号を衛星に送信する精度も時間間隔の相対誤差にして10兆分の1程度を達成していることが実証できました。

観測天体はオリオン座のオリオン大星雲（M42）のなかにある水メーザ天体で、観測は1998年3月に行われました。地上電波望遠鏡としてはアメリカ国立電波天文台のVLBA（Very Long Baseline Array）の10局を使用しました。得られた電波強度マップを示しました。オリオン大星雲は約1500光年の距離にあり、非常に活発に星が誕生していることで有名です。この星雲にある水メーザ天体の強度が1998年1月より急激に明るくなっていることを鹿児島大学理学部のグループが鹿児島にある6m電波望遠鏡を用いて発見しました。この情報をもとに「はるか」はこの天体を観測し、22GHzでの画像を得ることに成功しました。この観測

の時期にこの天体は通常100倍以上に明るくなっていました。「はるか」は打ち上げ後に22GHzの観測系に大きな信号ロスが発生していることが確認され、通常の明るさの天体の観測は困難でしたが、幸運にもこの非常に強い天体の出現で観測が可能になりました。水メーザ天体は、約1億kmの大きさを持っていることが明らかになりました。これは太陽と地球の距離に匹敵する大きさです。従来の観測ではこの天体の大きさを分解することはできず点源にしか見えませんでした。しかし、「はるか」の観測により像を分解することができ構造がわかりました。メーザの発振機構や急激な増光の原因については未だ定説がなく、「はるか」の観測によって今後の研究の進展が期待されます。

（小林秀行）



★メーザー

メーザーはMASERと綴ります。Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation の略で、訳すと、「誘導放射によるマイクロ波増幅」です。これがマイクロ波の代りに光（Light）にすると、皆さん良く御存知の、レーザーLASERとなります。マイクロ波は電波の分類の一つで、1メートルより波長の短い電波のことです。「はるか」の観測波長はマイクロ波です。

宇宙には、分子雲とよばれる、温度の比較的低いガスの塊が漂っているところがあります。主成分は水素分子（H₂）ですが、そのほかに、一酸化炭素、水蒸気や、水酸基（OH）、アルコールやアンモニアなどいろいろな分子があります。この分子ガスが、高密度の状態になって分子同士ぶつかったり、星な

どから強い放射を受けたりすると、いくつかの種類の分子ではその多数が電波を出しやすい状態（逆起状態）になることがあります。そこへ、分子雲の外から電波が入るとその電波に分子が刺激を受けて、電波を放出します。放出された電波はまた次の分子に刺激をあたえ電波を放出させ、こうして、次から次へと電波が増えていき、そのガス雲を出るときには、入ってきた電波の強さは高い倍率で増幅されます。こうして、「明るい」天体ができます。このメーザというのは、その分子の種類によって増幅できる電波の波長が違い、水蒸気なら1.348cm、水酸基なら17.98cmと決まっています。このため、『スペクトル線』（ある特定の波長(周波数)の電磁波のみが明るい状態）として観測されます。

臼田Kuリンク局

臼田Kuリンク局。あまり聞き慣れない名前ですが、臼田の10mアンテナといえば、64mの大きなアンテナの横にちょこんと写った写真を見たことがある人も多いと思います。この10mアンテナとそれに連なるシステムが臼田Kuリンク局で、「はるか」が天体観測を行うために欠かせない支援を行っています。

「はるか」が行うVLBIは特殊な装置を使う観測方法です。重要な装置の一つが水素メーザ発振器。非常に高精度な時計といえます。世界中に離れている電波望遠鏡で一斉にVLBI観測するために、高精度な時計で時刻合わせをし、その状態が保たれる必要があります。そしてテープレコーダも重要です。世界中に離れている電波望遠鏡で観測したデータはその場では処理できません。いったん磁気テープに記録して、相関処理局に持ち寄るのです。

さて、宇宙空間を飛ぶ「はるか」の場合、宇宙空間の厳しい環境に水素メーザを持っていくことができません。それに磁気テープに記録しても地上に持って帰ることができません。この問題を解決するのがKuリンク局なのです。

「はるか」に水素メーザを搭載する代わりに、臼田Kuリンク局は15.3GHzの非常に安定な電波基準信号を送信します。これを“アップリンク”といいます。このアップリンク信号を「はるか」が受信すると、水素メーザを搭載しているのと同様の観測を行うことができます。そして「はるか」が観測したデータは磁気テープに記録する代わりにリアルタイムで14.2GHzの電波信号に乗せて臼田Kuリンク局へと送信されます。これを“ダウンリンク”といいます。臼田Kuリンク局ではダウンリンク信号を受信し、それを磁気テープに記録します。

「はるか」打ち上げから一ヶ月経過した1997年3月12日、臼田Kuリンク局は初めて「はるか」にアップリンク信号を送信し、観測信号に乗せたダウンリンクを受信しました。その後の基礎実験の後、3月24日に星形成領域W49Nの方向に望遠鏡を向け、水酸基分子が放射する1.6GHzの線スペクトル電波を受信しました。臼田Kuリンク局ではダウンリンク信号をリアルタイムで解析し、「はるか」の受信信号の中にかすかながらもはっきりと水酸基分子の基線スペクトルが存在することを確認しました。このとき初めて「はるか」は電波望遠鏡としての性能が確認されたわけです。5月7日にはVLBI観測が行われ、臼田Kuリンク局と臼田64mアンテナでそれぞれ磁気テープに記録が行われまし



た。相関局で処理した結果、この二つの観測局で得た観測信号から「相関」が検出され、VLBIの観測に成功したことが確認されました。こうして「はるか」は臼田Kuリンク局の支援によって一人前のVLBI観測局となったわけです。臼田Kuリンク局は現在もほとんど毎日「はるか」の観測を支援し続けています。

「はるか」によるVLBI観測の支援の他に、臼田Kuリンク局は衛星を使った工学実験の実験台としても活躍しています。たとえば「はるか」が受信するアップリンク信号を制御する実験。「はるか」が水素メーザを搭載しているのと同じ状態で観測できるためには、アップリンク信号の周波数を精密に制御する必要があります。そのための実験開発などが行われています。もう一つは「はるか」と臼田Kuリンク局の間にある大気が通信に及ぼす影響の実験です。大気のゆらぎによってアップ・ダウンリンク信号が変動することから、逆に大気のゆらぎの様子を調べることができるのです。

世界には臼田の他にKuリンク局がアメリカに2カ所、オーストラリアとスペインに1カ所ずつ、合計5カ所あります。「はるか」が臼田で見えている時間は限られていますが、世界中のリンク局が次々とほとんどいつでも「はるか」と通信を行って、観測の支援を続けています。（国立天文台・川口則幸、藤沢健太）

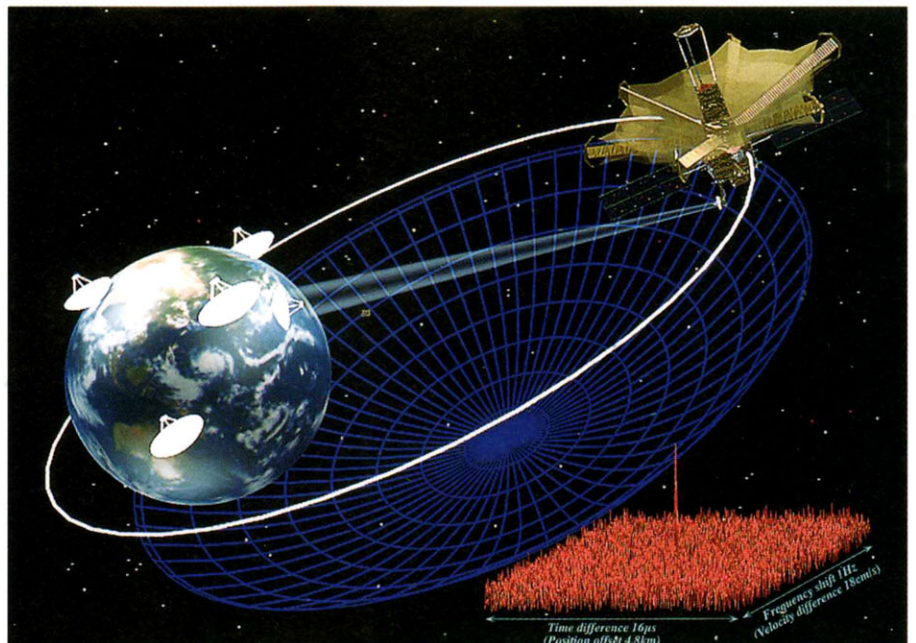
三鷹 相 関 局

1997年5月13日、「はるか」が打ち上げられて3ヶ月後のこの日、国立天文台三鷹相関局で世界に先駆けてVSOP衛星「はるか」と地上望遠鏡の間のフリンジが見つけられました。衛星に乗せた電波望遠鏡とともにスペースVLBIをおこなうVSOP計画の成功が確認できた時です。最初に、相関処理やフリンジについて説明しておきましょう。VLBI観測では遠く離れた電波望遠鏡（観測局）で同時に同じ天体を観測します。受信された天体からの電波は、各観測局で磁気テープに記録し、テープを相関局に集めます。この集めた磁気テープを同時に再生してデータ処理を行います。このとき行うVLBI観測独特のデータ処理を相関処理と呼び、相関器と呼ばれる専用の大型計算機が使われます。フィルムを使った写真撮影に例えてみると、写真では撮影した後フィルムを現像し印画紙に焼き付けてでき上がりますが、相関処理はちょうど現像処理の部分に相当します。相関処理を一言で説明するのは難しいのですが、各観測局で受信した電波を互いに比較して似ている度合いを調べるものと考えてください。ただし、天体から各観測局までの距離は異なっていますし、地球の運動によって各観測局の天体に対する速度も異なってしまうので、天体から出た電波が観測局に到達する時刻がずれてしまううえ、ドップラー効果により周波数もずれてしまいます。そのため、相関処理を行うときには、あらかじめ到着時刻の差や周波数変化分を計算しておいて相関器の中で補正を加えながら比較を行います。処理後のデータを足し合わせる時に、この補正を正しく行くと強度が強くなり、正しくないと弱めあってしまい何も見えなくなります。この強めあった状態を『フリンジ』と呼んでいます。つまりフリンジが見えたことは、観測とその相関処理が成功した証拠というわけです。この相関処理を行うところが相関局です。VSOP観測の相関局は、日本の国立天文台（三鷹）、アメリカ合衆国の国立電波天文台（ソコロ）、そしてカナダのドミニオン電波天文台（ペンティクトン）にあります。

世界でVSOPに参加している電波望遠鏡は30ヶ所以上になりますが、これらの観測局での磁気テープへの記録方式はいろいろ異なっています。主な記

録方式は5種類ぐらいありますが、フィルムの規格が異なるようなもので、規格が異なる相関器では現像（相関処理）できません。例えば、ソコロ相関局ではVLBA方式の磁気テープ、ペンティクトン相関局ではS2方式の磁気テープしか相関処理できません。三鷹相関局はVSOP方式に対応していますが、世界中の望遠鏡を有効に使えるように記録方式を変換できるコピー装置を持っています。これによってVLBA方式やS2方式で記録してある磁気テープをVSOP方式に変換して相関処理が行えます。三鷹相関器はVSOP観測の相関処理を目的として設計・製作され、1995年2月国立天文台三鷹構内に設置され、宇宙科学研究所と国立天文台の協力のもとに運営されています。三鷹相関局には、相関器に加え10局分の磁気テープ再生機、S2方式とVLBA方式のコピーシステム各2台、それらの制御用計算機そして解析用計算機（印画紙への焼き付けを行う部分に相当）が備え付けられ、日夜、磁気テープのコピーや相関処理が行われています。三鷹相関局では、VSOP以外にも、国立天文台の3望遠鏡（野辺山、水沢、鹿児島）に通信総合研究所鹿島を加えた日本国内VLBI観測（J-net）、オーストラリア、中国、日本の環太平洋VLBI観測、そして昭和基地、オーストラリア、南アフリカの南極VLBI観測などの相関処理も行っており、広く日本や世界のVLBIに貢献しています。

（国立天文台・柴田克典）



臼田64m望遠鏡と「はるか」のスペースVLBI観測の最初のフリンジ（右下）。中央の鋭いピークが相関結果が強めあっていることを示しています。観測周波数は1.6GHzで天体は活動銀河核1519-273です。

地上電波望遠鏡

「はるか」は地上の電波望遠鏡と共同して観測することによって、巨大な電波望遠鏡を宇宙に作り上げています。地上の電波望遠鏡なしには観測が成り立ちません。宇宙を観測する電波望遠鏡のうちVLBI観測に参加できるものは世界中に約30局あります。そのほとんどすべてがVSOP観測に参加しています。国別には日本、アメリカ、オーストラリア、イギリス、ドイツ、オランダ、イタリア、スウェーデン、ポーランド、ウクライナ、中国、南アフリカと12の国が参加しています。日本では、臼田宇宙空間観測所の64mアンテナや通信総合研究所の34mアンテナ、さらに国立天文台の45mアンテナが参加しています。

各電波望遠鏡は安定な周波数源である水素メーザー時計を持ち、「はるか」と同時に観測した天体の信号を磁気テープに記録します。天体の信号はたいへん微弱ですから低雑音で増幅する必要があり、多くの地上電波望遠鏡では冷却して雑音を極力落した受信装置を使用します。臼田64mアンテナは深宇宙探査衛星の受信ばかりではなく、世界で唯一、1.6GHz帯、5GHz帯、22GHz帯を同時受信できる地上電波望遠鏡としても

活躍しています。64mのアンテナで集光された電波は各周波数帯の冷却された受信装置に入り増幅されます。

各地上望遠鏡は、それぞれの他の観測や業務（例えば臼田では「のぞみ」や「Geotail」の追跡業務）とのスケジュール調整を行いながら、多い局では年間1500時間以上の観測時間をVSOPに割り当てています。これもVSOP観測への期待の大きさを物語っています。

（小林秀行）



通信総合研究所、鹿島34mアンテナ

通信総合研究所（CRL）は、鹿島34m電波望遠鏡を用いたVSOP国際観測に参加しています。この研究観測は、CRLと宇宙科学研究所（ISAS）との共同研究の一環として位置付けられ、1988年4月に締結された「宇宙空間VLBIに関する共同研究」を端緒としています。もっとも、それ以前から臼田64mVLBI観測局の立ち上げや、米国のデータ中継衛星（TDRS）を利用した世界初のスペースVLBI実験サポートなどを通じて、相互協力体制の下地ができていました。

鹿島34m電波望遠鏡は、1.5GHzから43GHzまでの電波天文観測バンドをカバーする6周波数帯の高感度受信器を搭載し、しかも、全天指向および高速駆動が可能な世界にも例のない優れた特徴を持っています。こうした機能は、今度の「VSOP」観測に活用され、1.6GHz帯、5GHz帯、22GHz帯と「VSOP」観測で使用される周波数帯を全てをカバーする数少ないVLBI観測局のアンテナとして使用されています。また、鹿島VLBI観測局は、衛星「はるか」との同時VLBI観測のみならず、臼田地上局や三鷹相関局の機能確認や評価実験等にも貢献しています。

一方、鹿島34mVLBI観測局での「VSOP」観測運用面では、国立天文台グループとの連携、観測データ収集専用装置の配備、そして観測オペレータ派遣制度の導入など、互いの機関にとってメリットの多い、新たな協力体制が構築されました。

今後もこうした協力体制を維持し、各種研究開発実験や次世代スペースVLBI計画の推進など、鹿島VLBIグループの特徴を活かした研究協力を考えています。

（通信総合研究所・栗原則幸）



「はるか」が結ぶネットワーク



1967年にカナダのグループが世界最初のVLBI観測に成功してから、遅れること数ヵ月、アメリカのグループもVLBI観測に成功しました。この観測から、遠距離にある銀河やキューサからの電波放射が、非常にエネルギーが高く、しかも非常に狭い領域から出ていることが分かりました。VLBIの解像度は約1000分の1秒角（360万分の1度）です。これは、札幌にある納豆の粒を鹿児島からみることに相当します。たくさんの電波天体が、VLBIにより米国、欧州、豪州そして日本等の国際的なグループによって研究されました。

VLBIの解像度を上げるためには、複数の望遠鏡をできるだけ離して置かなければなりません。1980年代にはいつて天文学者達が宇宙に電波望遠鏡を置くことを考え始めたのは自然な流れでした。しかし、欧州、米国、そしてロシアのスペースVLBIのプロジェクトはことごとく予算獲得に失敗しました。結局、日本が1997年に最初の電波望遠鏡を宇宙に打ち上げるようになりました。

VSOP計画は宇宙科学研究所によって1989年から始まりました。このプロジェクトには、衛星だけでなく、地上の望遠鏡、衛星の受信局が必要で、さらにこれら複数の局のデータを処理して、天体画像の処理をする必要があります。このため、国際的な協力が必須でした。多くの国々がさまざまな技術や設備をもっており、喜んでこの国際プロジェクトに参加しました。

米国国立電波天文台（NRAO）は1991年から、VLBA（米国のVLBI型干渉計）を運用してきました。VLBAは米国内に東西に分布する10台の電波望遠鏡からなり、本部はニューメキシコ州のソコロにあります。

VLBAは、優れた相関器と画像処理システムをもった、世界でもっとも成果を出しているVLBI装置です。宇宙研とNRAOの国際協力は、VSOPプロジェクトが始まってから、すぐに始まりました。

NRAOは4つの項目についてVSOPプロジェクトへの貢献を果たしてきました。1つめは、VLBAの全観測時間の30%をVSOPに使用することを決めました。VLBAへの観測申し込みに対する倍率は約2倍で非常に人気のある観測装置です。これは、NRAOや世界中の天文のコミュニティが、VSOPプロジェクトがよい観測結果を出すためのまたとないチャンスであり、そのミッション期間が3～5年と限られているため、できるだけ最適な地上望遠鏡を使うべきであると感じていたからです。

2番目の貢献は、NASAは5つの内3つの「はるか」の衛星受信局を提供し、NRAOは1つの衛星受信局を建設しました。この衛星受信局は非常に信頼性があります。

3番目に、「はるか」と地上電波望遠鏡の信号を合成する相関器です。これは、テラフロップス（浮動小数点演算回数が1秒間に1兆回）相当の処理能力をもつ専用計算機です。VLBAの相関器を、スペースVLBIでも使用可能にするために、2年あまりの改修作業が必要でした。VLBAの相関器は、VLBA、NASAのDSN 70m望遠鏡、および欧州の望遠鏡からのデータの処理に使用されています。

最後に、キューサーからの微弱な電波信号から、高解像度の画像を作成するデータ処理ソフトウェアです。このソフトウェアは、すでにVLBAのためにNRAOで開発されていました。このソフトウェアを用いVSOPのデータも扱えるようにするため改修を行いました。この処理ソフトウェアはミドルクラスのワークステーションで簡単に動作させることができ、世界中の100以上の天文台に配布されています。ほとんどの天文学者は、VSOPのデータを自分の研究室で処理することができます。

NRAOは、解像度や感度がさらに良くなる将来のスペースVLBI計画に期待しています。世界中の天文学コミュニティが、VSOPで得た経験を活かして、さらなる、科学的な進歩を達成できるでしょう。

（米国国立電波天文台・E.Fomalont）訳：村田泰宏

25年前に我々のグループは、スペースVLBI用の10mのアンテナをスペースシャトルを使って軌道に上げる、というJPLのプロジェクトを進めていました。世界中のいくつかのグループも同じようなことを考えていました。15年前に、豪州、日本、および米国のグループが協力してTDRS衛星を使ってスペースVLBI技術を確認するための実験を行いました。10年前には、世界中のスペースVLBIのグループが相模原に会して、VSOPのための最初の公式の国際会議を開きました。

このプロジェクトには、実にいろいろな背景を持った人々が参加しています。仕事の仕方もさまざまです。例えば、西欧人は「その仕事は明日までにします」といってからしばらくすると、「済みません、後かもしれません」と言います。日本人は「多分できません。」と言ってからしばらくすると「済みません、できてしまいました。」と言います。宇宙関連機関（フォーマルで几帳面）とそれ以外の機関（インフォーマルで速い）の違いもありました。そして、我々が皆、共に働くことができたのは、幸運なことに、すべての人たちが英語をコミュニケーションの手段として受け入れてくれたことです。

日本のプロジェクトは高品質のブランデーからVSOPとつけられています。それなら、われわれもとプロジェクトの名前をいろいろと考えました。ロシアのプロジェクトはVODKA (VLBI Orbiting Dish for Kosmological Astronomy) がいいでしょう。米国のプロジェクトは、DIAQUIRI (Developing Astronomical Images of Quasars Using International Radio Interferometry) というところでしょうか？

観測運用をしているあいだ、考えられるすべての小さなトラブルを起こしました。衛星が考えたとおりに動かなかったり、逆に間違ったコマンドを打ってしまっ



たり、衛星受信局の時計が知らないうちに狂っていたり。相関器が違う相関窓を見ていたり、望遠鏡が違う波長の電波を観測していたり、違う天体を見てしまったり。

しかし、スペースVLBIのミッションはうまく組織されスムーズに運用され、成功を納めました。そして、スペースVLBIのミッションがユニークな科学的成果をだせることが分かりました。色々な文化をもった世界中の何十もの機関の、何百人もの科学者、技術者が共に苦労して宇宙の神秘を説き明かすための、新しい種類の国際的な観測装置を作り上げることに成功したのです。

10年後には、また我々はまたどこかに集まって、次のスペースVLBI計画の成功を祝っているでしょう。それは、欧州か、日本か、ロシアか米国か？ 非常にスムーズな運用と、われわれのエキサイティングな発見と成功に乾杯。

(NASA ジェット推進研究所・J.Smith) 訳：村田泰宏

VSOP, 夢がかなった! (ヨーロッパからの見方)

VLBIの歴史は、人類の宇宙の歴史と比べると10年若い。最初のVLBIの実験は1967年に行われ、一方、最初の人工衛星は1957年でした。VIBIの天文学者はVLBI実験成功の日から、干渉計の基線を宇宙へ伸ばすことを夢見ていました。なぜでしょう？ 望遠鏡の分解能は、波長が与えられると、その大きさに反比例します。干渉計の場合、“大きさ”はその基線長に当たります。最初のVLBI観測では電波天体の大きさはとても小さくて、大陸間の基線でもその最も高エネルギーの天体の構造を見るには十分ではありませんでした。欧州のVLBI観測者は、1980年代の初期から中盤にかけて、いろいろなスペースVLBI計画のデザイ

ンの研究を行いました。VSOPが最初のスペースVLBI衛星になると分かりだしたころ（1993年頃）、欧州VLBIネットワークは、最大50%までの観測時間をスペースVLBIの観測にあてることを決めました。

欧州VLBIネットワーク（EVN）は、10ヶ国にある16の電波望遠鏡から構成されます（実際は、欧州だけでなく2つの中国の天文台、上海とウルムチもメンバーです）。ほとんどのEVNの電波望遠鏡は、それぞれ年間3~4週間の、EVN/広域観測セッションの時間をVSOPの公募観測にあてています。データはマーク4型もしくはVLBA型のデータレコーダで記録され、NRAOのソコロにあるVLBA相関器に送られます。更に、いくつかの欧州の電波望遠鏡はVSOPのサーベイ

観測プログラムに参加しており、S2型の記録装置で観測され、ペンティクトン（カナダ）のS2相関器もしくは三鷹の相関器により相関処理されています。

多くの欧州の天文学者がVSOP観測の観測提案者になっています。この特集号でもいろいろな観測結果が紹介されていますが、先日のEVNでのシンポジウムでも、いくつかのVSOPの結果が紹介されました。その結果については、New Astronomy Review誌から出版されます。宇宙にVLBI基線を伸ばすという夢は、現在、毎日実現しています。そして、最近のVSOPの結果は、VSOPがまだ最初の第1ステップの段階で、VSOP-2や、ARISEのような次の世代のスペースVLBIが必要であることを示しています。

最後に、この「VSOP」という名前は欧州の人々に特別な意味を持っています。なぜか？

まず、この名前は、非常に印象に残る名前であるヨーロッパ風（特にフランス風）であります。VSOPのゴッドファーザーである、森本さん、平林さんをはじめとする皆さんは、なぜこの名前にしたのでしょうか？私は、2年半もの間、VSOPの運用のための電話会議に参加してきました。この電話会議は、日本や豪州では、朝に始まります。そのとき、米国では、午後遅くで、ヨーロッパでは、0時から午前3時です！！これは、すてきな夢をみるにはちょっと具合の悪い時間です。

（ヨーロッパVLBI共同研究所・L.I.Gurvits）

訳：村田泰宏

VLBI, 思い出すままに

それは1980年代半ば頃のある日、私は小田所長、林先生のお伴をして、ロサンゼルス郊外のパサディナで開かれていたスペースVLBIの国際会議に出席していた。その会議は私のJPL時代の友人のDr.F.Jordan他によって開催されていた。会議の話題は当時打上げ計画中のソ連（当時）のラジオアストロンとESAのクエサットであった。前者はプロトンによる打上げで5トンであり、後者はアリアンの打上げで1トンであった。宇宙研の案は、当時使われていたM-3SII型による僅か250kgでしかなかった。“余り恥ずかしいから発表を止めましょうか”と小田所長に申し上げたら、“せっかく持って来たのだから話せ”とのご指示で私が発表したけれども、当然のことながら余り相手にされなかった記憶がある。しかし帰国後小田先生の強力な推進があり、またそれに続く方々のご努力が実って、M-V型の開発が進み、その1号機に800kg余りの「はるか」が打上げられ見事な成果を挙げられていることは、同慶の至りである。ちなみにクエサットは、会議後間もなくESA内部の順位調整で消えてしまい、ラジオアストロンはソ連の崩壊の影響を受けて、未だに実現したとは聞いていない。まさに有為転成の世の中である。

臼田64mφのアンテナを利用したVLBI実験（地上）は私が宇宙研に入所した頃からの念願であり、当時ほとんど唯一の実験成果を挙げていた通総研鹿島にしばしば通って川尻さん（現、NASDA）、高橋さん、河野さん（現、天文台）、川口さん（現、天文台）の方々に懇切丁寧に教えていただいたことを懐かしく思い出すと共にこの項を借りて感謝の意を表す。

さらに1986年にはNASAのTDRS（データ中継衛星）と臼田アンテナ等を使った日米豪共同のスペースVLBI実験が行われ、森本さん、平林さん（当時天文

台）達が臼田の受信機のパネルを開いて、実験用の回路をわが者顔につないでつくってしまい、私を始め宇宙研のメンバーは呆気にとられて見ていたのも懐かしい思い出である。もちろんそのお陰で世界最初のスペースVLBI実験として成功した。

JPLの故Dr.Renzettiは宇宙研のスペースVLBI実験を強力に推奨され、駒場に来訪された折は、太陽系の両端にVLBI衛星を上げて、太陽系規模のスペースVLBI実験を提唱されて居られたが、もう間近に迫った21世紀には夢ではないかも知れない。

私自身は現在、VLBI衛星又は小さなアンテナを搭載した周回衛星を使い、惑星探査機とクエサットの信号を同時受信し、“はるか”によって実現した位相転送の技術を使って地上局におろして、地上局の同様な受信信号との相関を取って（△VLBI）、惑星探査機の超高精度軌道決定が実現できるのではないかという夢を追って検討を進めている。

（西村敏充）



はるか物語

ここでは、日本の電波天文学が育ってきた土壌の古い話をしようと思います。太平洋戦争の末期、日本の海軍は静岡県大井川に面する島田の町に、マグネトロンの大きな研究所を造っていました。東北大学の渡邊寧先生と海軍技術陣のホープだった伊藤庸二技術大佐が中心人物だったと思います。面白いことにはアメリカのMITの、取り壊し中ですが今でも残っている古くMITに滞在された方々には懐かしい、ビルディング20も戦争中アメリカの物理屋他各分野の研究者を集めたマイクロ波の研究の中心になっていたのです。

さて、この島田の研究室に阪大の菊池正士先生が集められた先生方のなかに朝永振一郎、小谷正雄、萩原雄祐先生方がおられました。この三人の先生方は最もそれぞれの先生らしいマグネトロン発振の理論を展開しておられました。私も阪大の学部の菊池研究室の渡瀬先生の学生として参加したものでした。大学の研究室ではもう研究どころではなくなっていました。島田には研究所らしい雰囲気はみなぎっていました。

戦争が終わって、もともと私は原子核物理の学生でしたが、占領軍に原子核の研究は禁止されていました。渡瀬先生は今後の研究の方針として、宇宙線と電波の研究の二つの柱をたてられました。私は電波をやることになり、辛うじて残っていた、というよりも隠し持っていた海軍のマグネトロンを使って雑音の研究を始めました。マグネトロンの雑音は、本当の白色雑音ではなくて、真空度が少し悪いと起きてくる雑音と発振の中間のような不思議なものです。戦争中から戦後にかけて太陽からマイクロ波の電波がくることが知られていましたが、それがこのマグネトロンの雑音に似ているという感じがありました。そのころただひとつアメリカでの研究を知る手段がありました。それは戦前、東京日比谷にあった日東紅茶の喫茶室が、占領軍の図書室になって公開されていたのです。勿論、コピー機などありませんから雑誌を読んで頭にたたきこんで帰ってくるのです。

こうして阪大でも太陽電波の研究をしようということになりました。丁度そのころ、三鷹の天文台でまだ若かった畑中先生が、多分、萩原先生のサポートで太陽電波の観測を始められました。大阪から、はるばるまだ草深かった三鷹に出かけて行って、大阪にマイクロ波の電波天文台を作る相談をしたことを思い出します。その時の古い写真をみると畑中先生を中心に多分大学院だった海野さん、オーストラリアにいかれた鈴木さん、守山さんそして私が写っています。そんなところが当時の日本の電波天文学者(?)の総勢だったのでしょう。もっとも、当時東大の霜田光一さんが陸軍の古い聴音機の本製のパラボラに銅板を貼り付けて



部分日食のときの太陽電波を観測しています。これが当時唯一の意味のある観測だったのかもしれませんが。

さて、大阪中之島の阪大理学部屋上に高倉さんと廃兵器をかき集めてきて造った粗末な電波天文台を使って高倉さん、小塩さん、金子さんたちと色々な夢をふくらませました。その一つは私たちが“5行5列”と表現した多数のアンテナによる電波干渉計です。これは私市(きさいち)にある大阪市大の植物園に設置しようと設計までしましたが当時のお金で100万円が捻出できずあきらめたものです。干渉計は後に田中春夫さんが名大の空電研で見事に実現され、さらにのちに野辺山でも実現されました。もっとも、この“5行5列”は後に田中さんが書かれた本によると、コリレーターの考えが甘いのでやってもうまうまいかなかっただろうということでした。

さて、電波干渉計の考えは野辺山では石黒さんが実現することになりますが、後に地球規模のVLBIにまで発展して、関係者のだれもがすぐ考える事としてアンテナの一つを軌道にのせたスペースVLBIが出来ないかということがあります。1983年に、宇宙研に天文台の電波天文学者達、野村民也さん以下宇宙研の工学の面々、電波屋さん達が集まりました。私が“スペースVLBIという考えは荒唐無稽なのかどうか、議論して見よう、これが笑い話に終わるようだったら、この会合は一回だけにしよう”といったことを覚えています。ところが、笑い話ではなく“1~2m直径のパラボラでもよいから、軌道上に上げられたら、電波天文台としては面白いと思う”という話になって、この会合は何度も続けられることになりました。ツールーズ、ワシントンDCでのCOSPARの会合でもこの話が取り上げられました。こうしているうちに、本格的に計画を進めているのは日本だけになってしまっていて、それに外国の仲間が乗っかってくるということになりました。面白いことには先ず名前が先行します。この計画には、お酒が好きなことで国際的に有名な森本さんに因んで



VSOPという名がつけられました。アメリカのNRAOの窓口として、MITのバーニー・バーク他の人々、そしてJPLの人々が、日本では宇宙研の工学の人々が本気になりました。天文台からこのために宇宙研に移ってきた平林さん（外国ではHiraxという愛称でよばれる）を中心に計画が進められました。

アメリカに通信の中継をするTDRSという人工衛星があって、大きなパラボラが静止軌道上にあります。このパラボラと宇宙研がハレー彗星の探査機を追跡するために臼田の山中に用意した直径64mのパラボラとを使って、本当にスペース規模のVLBIができるものかという予備実験もJPL、宇宙研、天文台の間で行われ成功しました。

「はるか」では、アンテナとしてご婦人のストッキングのように細かい金属のメッシュに金メッキしたものが使われて、直径8~10mのパラボラが造られました。勿論そのまま宇宙研のロケットで飛ばすわけにはいきませんから、そこは宇宙研の工学の三浦さん達の出番でパラボラを折紙のように小さく畳んで、飛ばしてから軌道上で広げる事になりました。

こうして迎えた1997年2月12日、外国から沢山のお客さんもまじえて皆が見守るなかで、はじめてのスペースVLBI衛星「はるか」が誕生したのです。島田の頃から数えると、50年を越える月日が経っていました。ロケットの白煙をみながら、涙が出る想いでした。

（小田 稔）



「はるか」の特集号でした。打ち上げから900日あまりが過ぎました。ここに載せられなかった成果も、まだまだ続々とでていきます。なぜか、お酒のことが書かれた原稿が多かったですが、偶然です。編者の意図は全くありません。（村田）

呑み屋での話？

「スペースVLBIがやれないか」という最初の議論が呑み屋で行われた、という噂があります。どうもおじさんがその出席者の一人らしいのです。もちろん、呑み屋でそんな事を言い出す人といえば小田稔先生しか考えられません。小田先生の名前が出るとおじさんの記憶も「そんなことがあったような気がするな」となってきます。きっとホントなのでしょう。

M-Vの話に触発されたのかどうかも良く覚えていませんが、論理的に考えればイエスですよね。そう言われるとおじさんの記憶も段々そうなってきます。そして、呑み屋だろうがどこだろうが、触発だろうがどうだろうが「それならゼミをやろう」ということになりました。それ以後の経過はご承知のとおりです。

このように年寄りの記憶は不確かなので過去の話はこれくらいにして、現在と未来の話にしましょう。これなら記憶違いはありません。

今悪戦苦闘中のVERAが実現し、VSOP-II（2?）も実現し、そして何ステップかの後について人類は太陽系空間に展開したVLBI電波望遠鏡を持つことになります。こんなにトントン拍子に何もかも進む世界に住んでいると仮定しましょう。

コペルニクス、ニュートンで太陽系の地図を手に入れた人類はVERAで銀河系の地図を手に入れます。太陽系はほとんど平面ですから「地図」でぴったりにですが銀河系はもう少し立体的です。「模型」とでも言ったほうが良いかもしれません。そして次は宇宙の地図だか模型です。

150億光年先の点光源から発した球面波は、木星軌道くらいの開口で見ると平面波との差が数ミリになります。現在地上、あるいは軌道上の電波望遠鏡で十分にはかれる量です。これをはかってしまえば宇宙の隅から隅まで距離がはかれることになります。

太陽系から外に出ないで宇宙の大きさが幾何学的にはかれる、太陽系も案外捨てたものではありません。まあ、太陽系の大きさより小さい「点光源」が存在しなければダメ、なんて堅いことを言う人もいるでしょうがこれも呑み屋での話です。良いことにしてもらいましょう。

輝かしいVLBIの未来に万歳、輝かしいスペースVLBIの未来に万歳、そしてそれらを大きく包含する呑み屋の未来に万歳。

（森本雅樹）

ISASニュース

No.221 1999.8

ISSN 0285-2861

発行：宇宙科学研究所(文部省) ☎229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1 TEL 042-759-8009

The Institute of Space and Astronautical Science

◆本ニュースに関するお問い合わせは、上記の電話(庶務課法規・出版係)までお願いいたします。(無断転載不可)

*なお、本ニュースは、インターネットでもご覧になれます (<http://www.isas.ac.jp>)。