

# スペース VLBI 計画 VSOP

井 上 允\*

## 1. スペースへ

宇宙科学研究所が東京大学から分離・改組して間もない1980年代初めのこと。時の小田所長の、「Mu ロケットで打ち上げる衛星で VLBI をやる計画が、真面目な検討に値するかどうか、とにかく関係者が集まって話し合いたい。」という呼びかけに応じて、宇宙科学研究所で検討会が開かれたのが1983年1月13日であった。東京天文台から5人、総計で約25人が参加し、「全然問題にならぬ案ではないようだ。科学的には画期的な成果が期待されよう。」という結論を得て、少なくとももう一度検討会を開くことになった。非常に控えめな呼びかけではあったが、宇宙科学研究所の工学・理学系および国立天文台のそれぞれの研究者が、それぞれの興味をもって参加し、国際的にも広い協力体制が取られるというその後の展開に見られるように、よく先を見通した提起であった。

さて、この時期はどのような時代だったのだろうか。1970年代の終わりにソ連は大口径アンテナを宇宙に展開する計画を提案し、一方アメリカは1982年中頃、スペースシャトルに50mのアンテナを搭載し、VLBIを行なう提案を行なっていた。さらにヨーロッパでは1982年末、QUASATの検討が始まった、という状況で、スペース VLBI に対する機運は国際的に急速に盛り上がって来た時期であった。その後色々な計画の消長があり、現在、打ち上げが具体的に計画されているのは我々の VSOP (VLBI Space Observatory Program) とソ連の RADIOASTRON の2つだけである。1989年末に宇宙科学研究所で行なわれた国際的な VSOP のシンポジウムには、世界13カ国から50名以上の参加があり、熱心な討論が行なわれた。各国の期待の大きさと同時に、各国の協力体制が不可欠である世界的な計画であることが明らかになったシンポジウムであった。

宇宙科学研究所であらたに開発されることになった大型ロケット M-V 型の初号機として打ち上げられる VSOP 衛星は、VLBI としての成果はもちろん、工学的な側面も色々興味ある問題を含んでいる。最初の会合から12年後の1995年に打ち上げ予定の VSOP について、VLBI の説明も含め、紹介しよう。

## 2. VLBI: 最大の望遠鏡システム

ここでまず、VLBI (Very Long Baseline Interferometry) について述べよう。超長基線干渉計と訳されているこの望遠鏡システムは、電波の、波としての性質を利用した干渉計の一種である。干渉計については、本誌3月号(第83巻)の前田氏の記事に詳しい。干渉計では2つ1組のアンテナで受信した電波を干渉させて相関出力を得る。これは天体の輝度分布の、ある空間周波数成分に対応している。2つのアンテナに入射する電波の位相差は、1組のアンテナの互いの光路差によって決まる。1組のアンテナの正面から入射する場合は光路差はないが、斜に入射するにしたがって、それぞれのアンテナに達する光路差が大きくなる。正面に対してどのくらい斜になったかを、位相差を検出することにより測定するのが干渉計である。このように、角度に敏感な望遠鏡というのはすなわち、細かい構造まで見える望遠鏡である。上の説明で明らかのように、細かい構造を見る能力(分解能)は、光路差を波の位相で検出するので、波長が短いほど上がる。また、2つのアンテナの距離(基線長)が大きいくほど、同じ傾きでも光路差は大きくなり、分解能が上がる。結局、分解能は観測波長を基線長で割ったものとなる。例えば、おおよそ地球の半径にあたる6000kmを基線長とし、波長1cmの電波で観測した場合、分解能は6億分の1ラジアン、つまり0.3ミリ秒角になる。これは月面上の60cmを見分けることに相当する。このような高い分解能で見る事が出来る天体はどのようなものであろうか。これについては後でふれることと

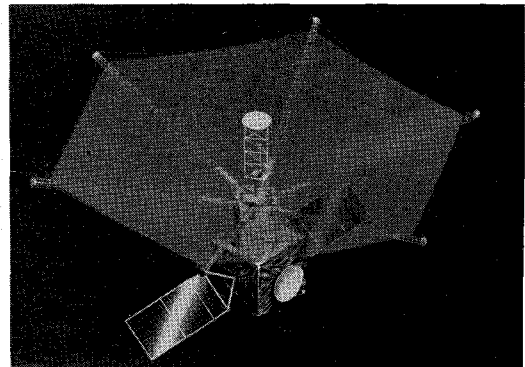


図1 VSOPの完成予想図。口径10m、鏡面メッシュのパラボラアンテナを搭載し、1.6, 5, 22GHzの3波長帯を受信する計画である。

\* 国立天文台 Makoto Inoue: Space VLBI Project VSOP

して、ここではもう少し基線の話をしよう。

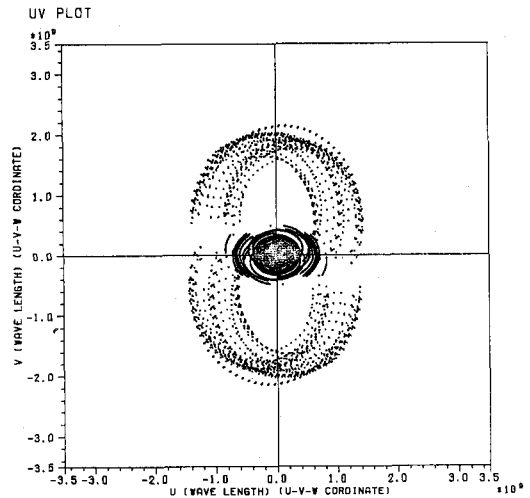
明らかなように、地球の直径以上の基線長は地上では取れない。さらに高い分解能を得るためには、アンテナを地球の外に持ち出せばよい。即ち図1に示すように、人工衛星にアンテナを搭載して（あるいはアンテナに衛星を付け足して？）地球周回軌道に打ち上げればよい。軌道半径が地球半径の数倍程度の場合、基線長が伸びるほかに、非常に有利なことがもう一つ加わる。それは衛星と地上のアンテナとで作る基線の向きおよび長さが、衛星の動きにつれて複雑に変換することである。これにより、空間周波数成分の多い、高品質の画像が得られる。図2は基線の組み合わせを評価するためのUV図と呼ばれるもので、基線の向きと長さが時間と共にどのように変化するかを示している。これが一様に密に埋められているほど高画質の像が得られる。図2(a)はVSOPの場合を示し、広く一様に分布し、非常に質のよい像が期待される。それに対して、図2(b)は後で述べるミリ波VLBI観測の例で、ミリ波で使用できるアンテナが少ないこともあり、基線の組み合わせは疎である。

### 3. 何を見るか

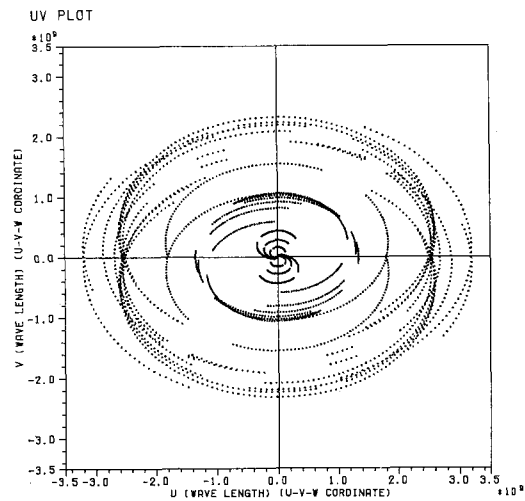
宇宙にまで広がった巨大な望遠鏡で、微細な構造を観測する。しかし、これで観測できる対象には制限がある。小さくて、しかも明るくなくてはいけない。つまり、表面輝度が高くないと観測が出来ない。従って、惑星や星の表面の模様などは見ることは難しい。そのかわり、星の周りのガスなどから放射されるメーザー源や、クェーサーなど活動銀河の中心核など、非常に小さく他の方法では全く観測不可能な天体が主な観測対象となる。

前者はOH、H<sub>2</sub>O、SiOなどの限られた分子が、メーザー発振により、ある特定の波長で非常に強い電波を放射する現象である。これらの観測によって、メーザー発振のメカニズムやガスの物理状態が明らかになり、星の大気や質量放出などが解明される。しかしメーザー源の観測はさらに、天体の距離の測定や精密位置の決定に大きく役立つ。

メーザー源までの距離の測定は非常に特殊な方法を用いる。メーザー源は通常、位置や速度の異なるたくさんのメーザー源の集合として、それぞれの天体に付随している。ここで簡単のため、中心の星から等方的に外側に飛び出していると考えよう。視線方向の速度は輝線スペクトルのドブラーシフトで測定する。視線に垂直な方向の速度は、位置の変化として角速度でわかる。この2つの速度が、目的天体のメーザー源の集合全体として統計的に等しいとすれば、距離が求められる。実際、このようにして銀河系の中心にあるHII領域までの距離などが求められた。天体の距離の測定は、天文学にとって基本



(a)



(b)

図2 基線の組み合わせを示すUV図。それぞれの点に対応した空間周波数成分が得られ、従って、一様に、密に分布するほど、忠実でダイナミックレンジの高い像が得られる。2つの図のスケールは互いに等しく、波長を単位にして基線長を表している。

- (a) VSOPの場合、中心の黒い部分はVLBA(10局)によるもので、地上だけのVLBI観測の1つの理想的な組み合わせである。外側の繭のような形がVSOPとVLBAの組み合わせで出来る基線の組で、これは1日間の例を示す。日数が増えると、地上どうしの組み合わせについては変わらないが、VSOPと地上の組み合わせはさらに数が増えていく。上下(南北)方向に“穴”があるが、その他は比較的一様に分布している。
- (b) 3ミリ実験の場合を示す。野辺山, Onsala(スウェーデン), OVRO, Hat Creek, Kitt Peak(以上アメリカ)の5局が作るもので、分布は広がっている(分解能は高い)が疎である。

的なもので、非常に重要なものである。この方法でどこまで距離が求められるかは大変興味のあるところである。

精密位置の測定によって、星の固有運動がわかり、銀河回転が精度よく決まる。さらに近くの銀河のメーザー源まで観測できれば、いくつかの銀河の銀河回転がわかり、銀河のダイナミクスの解明に大きく貢献するであろう。例えば、単に固有運動の向きを知るだけで、銀河の回転がリーディングかトレーリングかの判定ができる。さらに、星とその回りのメーザー源の位置をそれぞれ電波と光で精密測定を行えば、長い歴史のある光学座標系と、精密な電波の座標系が結びつく。電波座標系はキューサーなど非常に遠方の宇宙論的天体を基準にしているので、非常によい慣性座標系である。

キューサーなどの中心核はメーザー源と異なり、特定の周波数の放射（線スペクトル）は無い。中心核には太陽質量の数億倍のブラックホールがあると考えられている。この巨大ブラックホールのまわりに出来る降積円盤では、X線から電波にまで至る莫大なエネルギーを放射する高エネルギー現象が起こっている。わずか1パーセクに満たない中心核領域が、通常の銀河全体よりもずっと明るく輝いている。この相対論的な高エネルギー現象の解明が、VLBI のもう一つの大きな課題である。降積円盤からは電磁波だけでなく、相対論的に加速された高エネルギープラズマが、ジェットとして数十万パーセクの距離まで吹き出される。このジェットの発生メカニズムは降積円盤の性質と深く関わっていると考えられているが、観測的には明らかにされていない。図3は代表的なキューサー 3C 273 のマップで、波長 6 cm のジェットと、北東端の中心核について波長 3 mm の高分解能マップを挿入図として示している。波長 3 mm のミリ波 VLBI 観測は 1988 年 3 月に行なわれた。この時期はちょうど光から電波にかけて強度が急激に増加したのが観測された時に当たり、さらに野辺山 45 m 鏡が参加して初の国際的 3 mm VLBI 実験が成功したときでもあった。強度の増加はあらたなジェットが吹き出される時に起こる。この時の分解能は 50 マイクロ秒角を達成し、これは 3C 273 では 0.1 パーセクに相当する。これだけの分解能で見てもすでにジェットは発生しており、しかも数年前にすでに吹き出されたジェットの方に向いている。この先数十キロパーセクの所には、X線から電波まで出して強く輝いている、良く知られたジェットがある。しかし、良く見ると直線上には並んでなく、多少波打っている。特にミリ波 VLBI の成分は複雑な並びをしている。このスケールのジェットがどのようにコリメートされ、どう揺らぐかは興味深い問題である。

強度変動は通常ミリ波あるいはさらに短波長で強い。

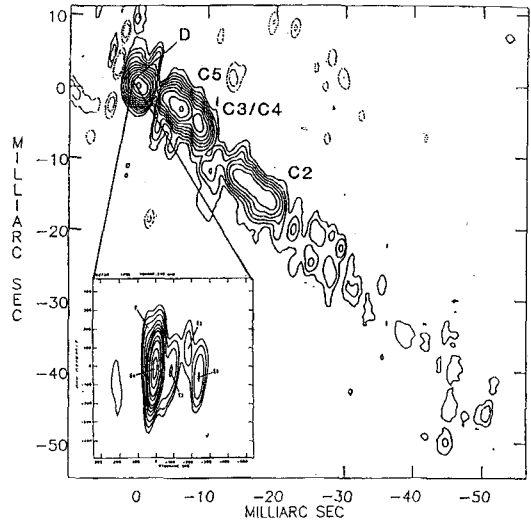


図 3 2C 273 の波長 6 cm および 3 mm のマップ。北東端に中心核があり、ジェットが南西に伸びている。中心核の拡大図(約 25 倍)が波長 3 mm のもので、ジェットの塊が複雑な形に並んでいる。これはジェットの発生・伝播のあらたな問題として興味深い。

また、短波長ほど、干渉計としての分解能は高くなる。従って、ミリ波 VLBI でこれら現象を観測するのは決定的に重要である。図2に見るように、分解能では、地上の 3 mm VLBI の方が、VSOP の最短波長 1.3 cm より高い。しかし画像の質は、ミリ波望遠鏡が少ないこと、感度が悪いことなどから、ミリ波 VLBI の方が数段劣る。ここから、VSOP とミリ波 VLBI との互いに相補的な共同観測が期待される。すなわち、ミリ波 VLBI で中心核の奥深く、降積円盤に迫り、VSOP で高画質の像によりジェットを解明する。さらに、高分解能の VLBI 観測に加え、キューサーの高エネルギー現象の解明には、X線の観測は重要である。1993年に宇宙科学研究所で打ち上げ予定のX線天文観測衛星 ASTRO-D との共同観測は、この点で非常に興味のあるテーマである。

ジェットについてはその発生とともに、伝播の解明も大きな課題である。ブラックホールからパーセクスケールの距離までは、光速に近い速度で伝播している。ジェットが視線方向に近い角度で我々に向かって来ることにより、動きが光速より早く見えたり、ドブラー効果で異常に明るく見えるなど、様々な興味ある現象を引き起こす。またキューサーは宇宙論的な距離にあるので、宇宙論のパラメーターについての情報が得られる。例えば、中心核のサイズやジェットの動き、強度などの統計から密度パラメーターやハッブル定数、中心核の進化などについての情報が得られる。

#### 4. VSOP

直径 10 m のパラボラアンテナを搭載し、スペースでの VLBI 局として活躍が期待される衛星は、Muses-B と呼ばれる工学実験衛星である。兄貴分の Muses-A (飛天) は、本年 2 月に打ち上げられ、月のスイングバイなどの実験を行なっている。打ち上げを 5 年後に控え、現在設計・検討が急ピッチで進められている。

衛星全体としては VLBI 局の 1 つとして働くが、各所に工学的に重要な新しい技術が採用され、実験される。まず、直径 10 m のアンテナは、1.6, 5, 22 GHz の 3 周波数を受信する。そのため面精度は 0.5 mm に作られる。これだけの大きな構造物を精度よく宇宙で展開するのは大変なことである。さらに、地上の VLBI 局では原子時計と高密度磁気記録装置が必須であるが、衛星には精度や重量の制限のために搭載できない。そこで地上から衛星の時計を高精度で合わせ、受信した大容量データを地上に伝送することが必要になる。衛星軌道は遠地点高度 20,000 km, 近地点高度 1,000 km, 約 6 時間で地球をひと回りする。従って、地球直径の 3 倍の基線長が得られる。周回の間出来るだけ途切れることなく時計合わせと、データ伝送を行なわなければならない。そのために NASA のジェット推進研究所 (JPL) がアメリカ国内、スペインおよびオーストラリアに専用の通信局を設置し、宇宙科学研究所鹿兒島局と合わせ世界に散らばった 4 局で、次々にリレーして衛星と通信を行なう。また、衛星の位置および速度決定も VLBI 観測には重要な項目である。後で述べるように VSOP 相関器では、位置や速度の測定がある程度不正確でも相関検出が行なえるように配慮される。しかし一旦相関が検出されれば、逆にそれから衛星の位置を精度よく求めるのは VLBI の得意とするところである。従って逆に衛星の軌道決定のよいキャリブレーションになるだろう。この応用として、地球の重心の高精度位置決定が検討されている。これにより、地球最深部の流体核中を漂動する金属核(地球の芯)の動きを検出出来るかも知れない。

以上のような工学的な実験がそれぞれうまく機能して、全体としてスペース VLBI として働く。これが VSOP と呼ばれる VLBI システムの計画である。VSOP が十分に性能を発揮するためには、上にあげたものよりさらに大きな広がりが必要である。そもそも地上の VLBI 観測局がなければならない。現在、VLBI 観測は各国の電波望遠鏡が協力して、アメリカおよびヨーロッパでネットワークを構成し、定期的に観測を行なっている。ヨーロッパネットワークについては、本誌 88 年 11 月号 (第 81 巻 326 頁) に筆者の簡単な紹介がある。これらのネットワーク、および、5 年後にはすでに稼働している

であるアメリカの専用 VLBI システム、VLBA はもちろん有力な協力局である。VSOP 衛星の各種状況とてらし合わせて、衛星とこれらの協力の観測スケジュールを作成するのは、それだけで大変な作業である。その前に、観測プロポーザルの受付・審査が、国際的な規模で行なわれる。プロポーザルや運用について権限を持つ、何らかの国際的委員会が必須となるだろう。衛星は純国産であるが、それをサポートして、VSOP として機能させる規模は国際的な広がりを持つものとなる。

#### 5. 相関局

衛星の観測データは地上の受信局に伝送し、磁気テープに記録する。同様に、地上の観測局も受信データを磁気テープに記録する。磁気テープに記録された大量のデータは、観測後ただちに相関処理のため相関局に送られる。相関器によって観測テープは再生され、相関出力を得る。相関処理は最低、観測実時間と同じ時間が必要で、さらに記録方式とも関係し、VLBI 観測装置の重要な構成要素である。特に VSOP の場合、得られたデータを自前で国内で処理するのは、学問を育てるのに必須のことで、また衛星の総合的な性能チェックという点からも重要である。相関局については、今月号の本誌「天文観測技術の最前線」に近田氏が野心的な案を展開しているので、ぜひ参照していただきたい。

レーザー源のように、限られた周波数成分しか出さないものを除き、一般の観測では、観測データの帯域は広いほど感度がよくなる。従って、観測帯域は出来るかぎり広くとる。VSOP では 128 Mbps という高速のデータ伝送回線を持つことが想定されている。これは直流から FM 放送の周波数までの全帯域を記録することと等価になる。あるいは、16メガバイトのメモリーを毎秒すべて書き換えることに相当する。われわれの相関局として現在検討されている案は、VSOP にはもちろん、今後の VLBI の幅広い要求に対応出来るものである。実際、バーストモードと呼ばれる、特にミリ波で威力を発揮すると期待される方式は、この相関器でなくては処理が出来ない。これは 256 Mbps という広帯域レコーダーと、さらに 4G サンプル/秒という高速 A/D 変換器を備えた新しい VLBI 記録装置で記録される。大気の揺らぎなどでコヒーレンスロスが起きるより短い時間で、バースト的に広帯域のデータを取り、あとでレコーダーにあった速度で記録していく。K-4 型と呼ばれるこの広帯域記録装置は、野辺山と通信総合研究所鹿島が協力して開発している。現在、野辺山・鹿島間で、43 GHz の SiO<sub>2</sub> レーザー源およびキューサー等の連続波波源のサーベイが始まるようとしている。また、3 mm のミリ波 VLBI 国際実験は現在野辺山 45 m 鏡が大きな役割を果たしている。

さらにバーストモード記録で観測効率が上がれば、活動銀河中心核をより鮮明に、また、より弱いものまで見ることが出来る。また波長 1 mm やさらに短波長の VLBI マッピングの実現性も大きくなる。ブラックホールの回りの降積円盤が見えるかどうか、非常に興味ある問題である。現在開発中の新しい VLBI 観測システム、K-4 型記録装置と相関局により、その可能性が大きく開けるものと期待される。

広帯域記録はまた、測地 VLBI などで用いる、遅延量を決定する場合にも極めて重要である。相関装置の設計検討には、測地の立場から国立天文台水沢の協力も大きい。このように、現在検討されている相関局は、VSOP を初め、ミリ波および測地 VLBI に非常に有効であり、国内の各 VLBI グループが大きな期待と感心を寄せているものである。相関局の建設は、宇宙科学研究所および国立天文台が協力して行なうことが検討されている。この強力で柔軟な次世代 VLBI システムを VSOP 打ち上げ前に早期に実現して、VSOP と共に新しい VLBI の分野を切り開くのは夢ではない。

6. おわりに

VSOP の進展を軸にして、現在、我が国の VLBI は大きく飛躍しようとしている。これは 2 つの大きな意義

を持っている。まず、スペースとの関連で、宇宙科学研究所および国立天文台との間の、新しい分野での協力関係を作り出したことである。天文学がスペースに移行していく、一つの具体例となろう。次には、国際的な関係である。上に見たように、VSOP に寄せられる国際的な期待および、協力体制の広がり是非常に大きい。国際的な共同観測システムをどのように組織・運用していくか、余り経験のない、しかし今後必要とされる仕事である。

一方それに対して、われわれ日本の VLBI 関係者にとって大きな問題は、われわれ自身の層の厚さである。国際的には、VSOP のデータをてぐすね引いて待っている研究者は多いが、国内では特に天体物理関係者が少ない。これは国内で閉じた VLBI 観測が行なえる装置がなく、観測の機会が欠けていたのが大きな要因と思われる。しかし現在では、上に述べたように、国内で VLBI 観測が独自に企画出来るようになり、また国際的に 45 m 鏡の参加が不可欠な観測もある。さらに、あらたな装置開発も非常に先進的なものである。このようななかで、VSOP にむけて観測・研究者の育成は急務と思われる。直接の関係者に加え、我が国の大勢の VLBI 研究者が期待して見守るなか、Musas-B: VSOP 衛星が成功裡に打ち上げられる、という場面を期待して。

天体観測専門誌

月刊天文ガイド

6月号 定価460円+91 5月7日発売

赤外線望遠鏡の時代

最近、天文のデータを取る装置は、電波、赤外、紫外、CCD など、可視光線でないものが主流。本号では赤外線望遠鏡にスポットを当て、どんなことがわかるかを探る。

南米の星空を見てほしい

アフリカの砂漠や塩の道を撮り続けてきた写真家片平孝氏の南米の山の中で撮影した美しい星空の作品特集。

New Face Test Report

簡易赤道儀と呼ばれる、安くて誰でも使える機械の紹介。

- 6月の星空 / 月・惑星 / 星雲・星団 / 天体写真 ● 6月の天文現象観測資料 ● 観測ガイド ● 天文計算 / ほかに

新刊案内

チロの天文シリーズ  
藤井旭の 世界の星空ガイド

藤井 旭 著

四六判 / 100ページ / 定価970円(税込) + 280

星を見るために海外のあちこちへ出かける天文ファンが多くなりました。本書は、いつでもどこでも星空の様子がわかるように、緯度別の星座図を、特に南半球中心の星空ガイドにまとめてあります。



(本書の主な内容)

- ★ 星空の楽しみ方 ★ 用意したいもの ★ 北緯 50° 付近の星空 ★ 北緯 35° 付近の星空 ★ 北緯 15° 付近の星空 ★ 赤道付近の星空 ★ 南緯 15° 付近の星空 ★ 南緯 35° 付近の星空 ★ 南半球の星空 ★ 世界の日食 ★ 惑星の動き ★ 世界の月食 ★ 月の満ち欠け表

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町 1-5-5  
☎ 03(292)1221・振替東京 7-128