

## 2.6 宇宙空間 VLBI 計画 (VSOP) の成果

村田 泰宏<sup>\*1</sup> 平林 久<sup>\*1</sup> 小林 秀行<sup>\*2</sup> 柴田 克典<sup>\*2</sup>  
 梅本 智文<sup>\*2</sup> フィリップ G. エドワーズ<sup>\*1</sup>

### 2.6 Space VLBI Mission: VSOP

By

Yasuhiro MURATA, Hisashi HIRABAYASHI, Hideyuki KOBAYASHI,  
 Katsunori M. SHIBATA, Tomofumi UMEMOTO, and P. G. EDWARDS

We succeeded in performing space VLBI observations using the VLBI satellite HALCA (VSOP satellite), launched in February, 1997 aboard the first M-V rocket developed by ISAS. The mission is led by ISAS and NAO, with the collaborations from CRL, NASA, NRAO, and other institutes and observatories in Europe, Australia, Canada, South-Africa, and China. We succeeded to make a lot of observations and to get the new features from the active galaxies, the cosmic jets, and other astronomical objects.

[キーワード] VSOP, 宇宙空間 VLBI, 活動銀河  
 VSOP, Space VLBI, Active galaxy

#### 1. はじめに

干渉計型の電波望遠鏡が発明されて以来、干渉計にたずさわる天文学者は基線長を伸ばすことを考えてきた。VLBI 実験の成功以来、基線長の長さを、地球の大きさくらいに延ばすことを実現した。さらに延ばそうとして、TDRSS 衛星を利用したスペース VLBI 実験<sup>(1)</sup>が行われた。この実験には、米国および豪州の研究者とともに、日本では、宇宙研、国立天文台、電波研究所（当時：現在の通信総合研究所）の共同による観測が立案され実行された。TDRSS 衛星とペアとなってフリンジを出すアンテナとして、宇宙研臼田 64m アンテナと電波研鹿島 26m のアンテナが参加した。また、相関処理も米国の Haystack と鹿島のそれぞれの相関器を利用して行なわれ、フリンジ検出に成功した。この実験の成功が、VSOP 計画の開始および成功につながっている。

#### 2. VSOP

VSOP は VLBI Space Observatory Programme の略称で、1997 年 2 月 12 日に打ち上げられたスペース VLBI 衛星「はるか」を利用して行なわれる VLBI 観測計画のことである。「はるか」は、近地点 560km、遠地点 21,600km の橿円軌道を持ち、約 3 万 km の基線をもつ干渉計を実現した。「はるか」は工学的な技術を確認するために打ち上げられ、工学的な目的の達成後は VSOP 観測のために利用されている<sup>(2),(3)</sup>。「はるか」の観測帯域は、1.6GHz, 5GHz および 22GHz の 3 バンドであったが、「はるか」の 22GHz のバンドについては、観測システムの感度低下が大きく<sup>(4)</sup>1 つの天体の観測<sup>(5)</sup>のみとなっているが、後述のとおり 1.6GHz, 5GHz のバンドでさまざまな天文学的成果をだすことに成功している。

「はるか」のコマンド伝送およびテレメトリー受信は、宇宙研鹿児島宇宙空間観測所の 20m アンテナのシステムを利用して S バンドで行なわれている。位相伝送および観測データ受信については、宇宙研臼田 10m アン

\*1 宇宙科学研究所

\*2 国立天文台

テナをはじめ、DSN のキャンベラ、ゴールドストーン、マドリッドの 3 局、米国国立電波天文台 (NRAO) のグリーンバンクの計 5箇所に追跡局があり、15GHz 帯を利用して追跡が行なわれている。データのダウンリンク速度は 128Mbps と高データ伝送率のものを利用している。

VSOP の観測は衛星のほかに、地上望遠鏡および相関局が必要である。VSOP の相関処理をしている相関局は、NRAO のソコロ、カナダのドミニオン電波天文台 (ペントン) 国立天文台の 3箇所で行なわれている。

地上望遠鏡群を組織してスペース VLBI 観測を円滑に遂行するために、URSI にGVWG (Global VLBI Working Group) が組織され、各望遠鏡ごとにスペース VLBI 観測への時間提供量を決め、そのリソースにしたがって、スケジュールを行っていく方式がとられた。それぞれの望遠鏡が、総観測時間の数%から、10 数% の時間を供出している。また、ミッション主導のサーベイ観測に対しては、さらに個々の地上望遠鏡の判断で時間を供出している。第 1 表に VSOP 観測に参加するおもな地上望遠鏡を示す。日本からは、鹿島、野辺山、白田が参加しているが、野辺山 45m は VSOP との共通バ

第 1 表 地上望遠鏡

望遠鏡名	Code	所在地	Array	口径	記録形式	バンド
Effelsberg	EB	ドイツ	EVN	100	MK4, VLBA	L, C, K
Jodrell Bank	MK76	イギリス	EVN	76	MK4, VLBA	L
Jodrell Mark II	JB26	イギリス	EVN	26	MK4, VLBA	C, K
Medicina	MC	イタリア	EVN	32	MK4	L, C, K
Metsaehovi	MH	フィンランド	EVN	14	VLBA	K
Noto	NT	イタリア	EVN	32	MK4, S2	L, C, K
Onsala	ON	スウェーデン	EVN	26	MK4	L, C
Shanghai	SH	中国	EVN	25	VLBA, S2	L, C
Torun	TR	ポーランド	EVN	32	VLBA	L, C
Westerbork	WB	オランダ	EVN	25	MK4	L, C
Goldstone	GO	米国	DSN	70	MK4	L, K
Robledo	RO	スペイン	DSN	70	MK4	L, K
Tidbinbillia	TI	オーストラリア	DSN	70	MK4, S2	L, K
Hartebeesthoek	HH	南アフリカ	SHEVE	26	MK4, S2	L, C
Hobart	HO	オーストラリア	SHEVE	26	S2	L, C, K
Mopra	MP	オーストラリア	SHEVE	22	S2	L, C, K
Ceduna	CD	オーストラリア	SHEVE	30	S2	C
ATCA	AT	オーストラリア	SHEVE	54	S2	L, C, K
Kashima	KA	日本	JAPAN	34	VSOP, (S2)	L, C, K
Nobeyama	NO	日本	JAPAN	45	VSOP	K
Usuda	UD	日本	JAPAN	64	VLBA, VSOP, S2*	L, C
Pie Town	PT	米国	VLBA	25	VLBA	L, C, K
Kitt Peak	KP	米国	VLBA	25	VLBA	L, C, K
Los Alamos	LA	米国	VLBA	25	VLBA	L, C, K
Brewster	BR	米国	VLBA	25	VLBA	L, C, K
Fort Davis	FD	米国	VLBA	25	VLBA	L, C, K
Saint Croix	SC	米国	VLBA	25	VLBA	L, C, K
North Liberty	NL	米国	VLBA	25	VLBA	L, C, K
Owens Valley	OV	米国	VLBA	25	VLBA	L, C, K
Mauna Kea	MK	米国	VLBA	25	VLBA	L, C, K
Hancock	HN	米国	VLBA	25	VLBA	L, C, K
VLA-27	Y	米国	NRAO	129 <sup>1</sup>	VLBA	L, C, K
Greenbank	GB	米国	NRAO	43	VLBA, S2	L, C, K
Arecibo	AR	プエルトリコ	NAIC	305	S2*, VLBA	L, C
Bear Lakes	BL	ロシア	RUSSIA	64	S2	L
Kalyazin	KL	ロシア	RUSSIA	64	S2	C

\* : VSOP 形式のテープは S2, VLBA 形式にテープコピーが可能。

<sup>1</sup> : Equivalent aperture size. (=25m×27)

ンドが 22GHz のみであったために、ほとんど参加できなかった。日本、および中国の上海の 3 局が、極東にある望遠鏡であり、それらの局のミッションへの参加が重要視されている。鹿島 34m 局は、臼田 64m 局と違い、VLBI 専用のアンテナであるために、VLBI 観測に対する制約が少なく、特に下記のサーベイ観測<sup>(6)</sup>について多大な観測成果を出している。

これらの地上望遠鏡は、「はるか」以前にも VLBI 観測を行って来た。データの記録形式は、VLBA, Mark4, S2, VSOP 型の 4 通りが使われている。観測フィールドシステム(観測制御ソフト)は、VSOP 型以外は、NASA/GSFC で開発された、MARK IV Field System Verion 9 (FS9)で制御できるようになっており、観測スケジュールとして、VEX 形式のものを受け付けるようになっている。ただし、VLBA 観測局については FS9 を採用せず、独自のフィールドシステムで運用されており、独自の形式のスケジュール (crd 形式) を使うようになっている。これらのスケジュールファイルは、NRAO で開発された、NRAO sched により作成することができる。以上の運用の流れについては、文献<sup>(7)</sup>。

地上望遠鏡も含めると 13 の国にまたがったおおきな計画であったにもかかわらず、すでにある VLBI の国際協力の流れや、各国の協力者の努力もあり、運用自体は、おおむね円滑にすすんでいる。ただし、「はるか」(VSOP のための衛星) 自体が不安定な時期がある分、観測の効率が落ちているが、打ち上げ後、3 年半を経過

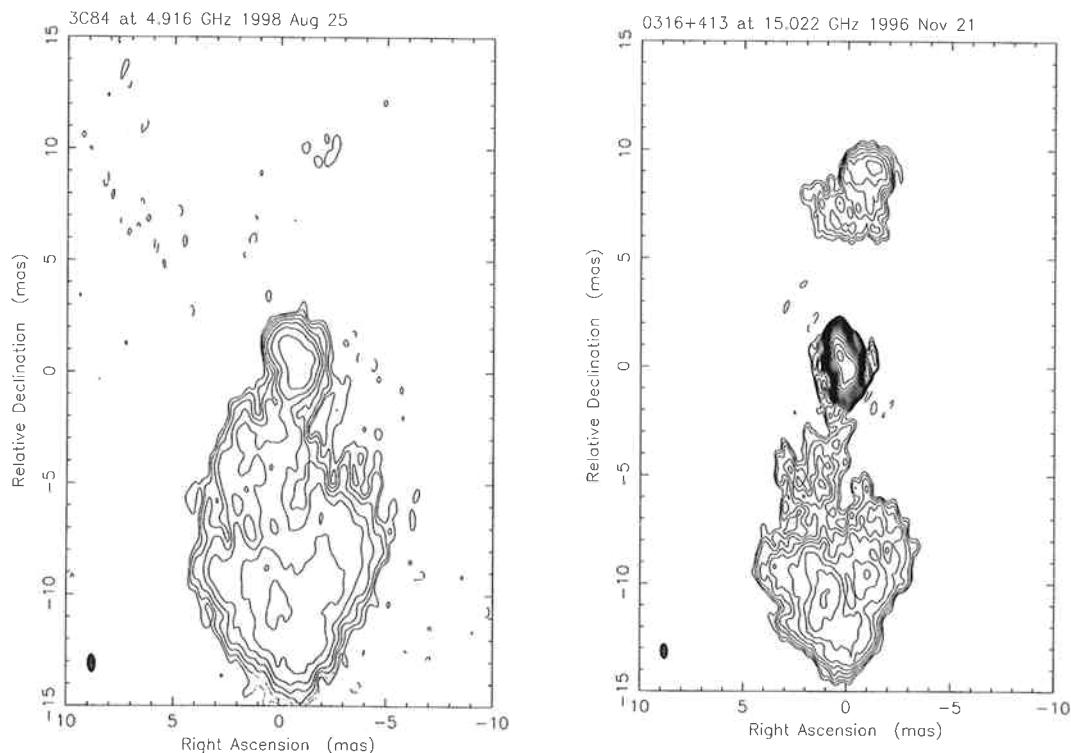
しているが、その間に行われた VLBI 観測は、2000 年の 11 月の段階で、総観測数約 600 観測である。その約 7 割が公募観測、約 3 割がサーベイ観測<sup>(6)</sup>である。観測公募は今までに 4 回行なわれている。

### 3. 観測結果

「はるか」を使った VSOP 観測は 1.6GHz, 5GHz では世界最高の分解能で観測をおこなうことができる。5GHz での分解能は最高であるが、22GHz, 43GHz での VLBA 観測よりは分解能はおとる。ただ、周波数が 3 倍も違うと実際は、天体の放射の様子もかなり変わるので、ある周波数で、最高分解能を得ることは、非常に重要である。その例を次にしめす。

第 1 図に浅田他<sup>(8)</sup>による 3C84 の観測結果を示す。左側が VSOP による 5GHz の観測、右側が、VLBA による 15GHz の観測である。基線長が 3 倍なのにに対して、波長も約 3 倍であるために、2 つの画像の解像度はほぼ等しい。中心の明るい部分が銀河の中心で、その上下に電波放射が観測されている。ただし、上側の放射は、15GHz で明るく、下側の放射は、5GHz で明るくなっている。

このことについては、いくつかの可能性が考えられるが、この観測を行ったグループは、この銀河の中心のまわりに、大きなトーラス状のプラズマがあり、上側の電波放射は、そのプラズマガスの中を通ってくるために、吸収を受けていると考えている。プラズマガスによる吸



第 1 図 VSOP 観測で得られた、3C84 の 5GHz での電波画像<sup>(8)</sup>と、VLBA で得られた 15GHz での電波画像<sup>(14)</sup>

収の場合は、低い周波数の電波のほうがより多く吸収を受けるために、高い周波数の方が明るく見える。一方南側の構造は、吸収を受けていないため、低い周波数で明るい、もともとジェットの電波放射をみていることになる。

このように、「はるか」の観測は、周波数間の電波強度の違いを高分解能で示すことにより、電波観測の1つの重要な観測量である、電波のスペクトルを高分解能で得ることに成功している。

また、電波強度から、観測天体の輝度温度（単位立体角あたりの明るさ）を調べる場合は、周波数によらず、基線長が長ければ長いほど輝度温度を調べるのに有利になる。「はるか」のこの特質を生かして、サーベイ観測を計画し、5GHzの観測を約200天体をピックアップして、その輝度温度を測定した<sup>(9),(10)</sup>。第2図がその輝度温度の頻度分布である。電波の放射メカニズムが熱的なものである場合、輝度温度は、その放射領域の物理温度に比例する。VSOPで観測しているものは、シンクロトロン放射という非熱的なものであるために、実際のその領域の温度がそうなっているわけではないが、輝度温度にして、10兆度を越えるものまで発見されている。このような非常に高い輝度温度は、実際の天体からの放射がこれほど強いとは考えにくく、ドップラ增幅作用のようなメカニズムが有効に働いた結果起きていると推定されている。

そのほか、さまざまな成果がVSOPから出ており、それらは、いくつかの文献<sup>(10),(11),(12)</sup>にまとめられている。

#### 4. ま と め

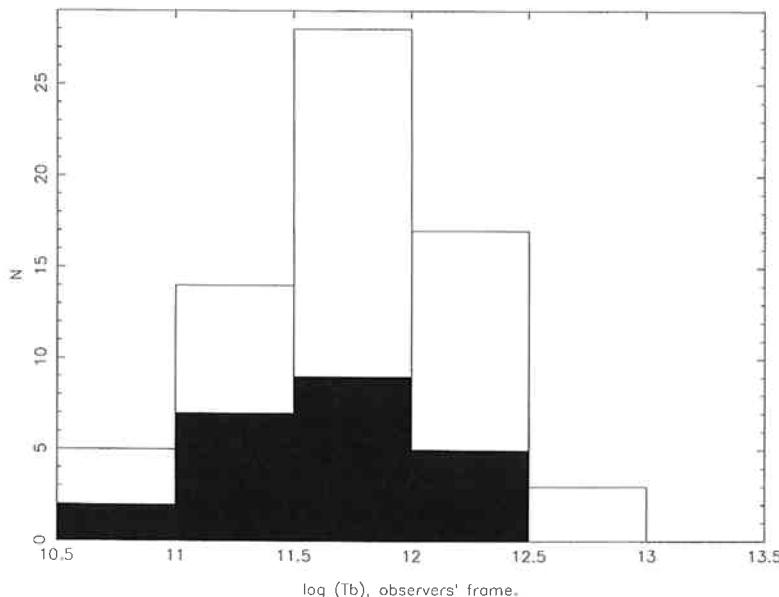
VSOPの観測が開始して3年以上が経ち、多くの観測成果を得ることができた。衛星や相関器などがプロジェクトの中では目立つ存在はあるが、それ以外にも、世界中で各地上望遠鏡、衛星追跡局などを運用している多くのかたがたの協力によってプロジェクトが成り立っている。国内では、宇宙科学研究所と国立天文台を中心となってプロジェクトを遂行しているが、通信総合研究所のVLBIへの取り組みとともにVSOPプロジェクトに発展してきたと言える。現在、VSOPに続く計画としてVSOP-2計画<sup>(13)</sup>の議論がはじめられている。宇宙科学研究所、天文台とともに通信総合研究所で研究がなされている、高速度データ記録による高感度VLBI、VLBI装置のI/Fの共通化(VSI)光通信などの技術がVSOP-2およびさらに発展的な天文観測装置につながっているようになると考えられる。

#### 謝 辞

著者は、本来VSOP計画に関係するすべての国内外の研究者、運用関係者に感謝します。

#### 参 考 文 献

- (1) G. S. Levy, R. P. Linfield, C. D. Edwards, J. S. Ulvestad, J. F. Jr. Jordan, S. J. Dinardo, C. S. Christensen, R. A. Preston, L. J. Skjerve, L. R. Stavert, B. F. Burke, A. R. Whitney, R. J. Cappallo, A. E. E. Rogers, K. B. Blaney, M. J.



第2図 VSOP サーベイ観測による、活動銀河の輝度温度分布。図は67天体について、観測者からみた輝度温度分布を示し、黒は輝度温度が測定されたもの、白は下限値が押さえられたものの下限値をしめしている<sup>(9)</sup>。

- Maher, C. H. Ottenhoff, D. L. Jauncey, W.L. Peters, J. Reynolds, T. Nishimura, T. Hayashi, T. Takano, T. Yamada, H. Hirabayashi, M. Morimoto, M. Inoue, T. Shiomi, N. Kawaguchi, H. Kunimori, M. Tokumaru, and F. Takahashi, "VLBI using a telescope in Earth orbit. I - The observations", *Astrophys. J.*, 336, pp.1098-1104, January 1989.
- (2) H. Hirabayashi, H. Hirosawa, H. Kobayashi, Y. Murata, P. G. Edwards, E. B. Fomalont, K. Fujisawa, T. Ichikawa, T. Kii, J. E. J. Lovell, G. A. Moellenbrock, R. Okayasu, M. Inoue, N. Kawaguchi, S. Horiuchi, S. Kameno, K. M. Shibata, Y. Asaki, T. Bushimata, S. Enome, T. Miyaji, T. Umemoto, V. Migenes, K. Wajima, J. Nakajima, M. Morimoto, J. Ellis, D. L. Meier, D. W. Murphy, R. A. Preston, J. G. Smith, S. J. Tingay, D. L. Traub, R. D. Wietfeldt, J. M. Benson, M. J. Claussen, C. Flatters, J. D. Ronmey, J. S. Ulvestad, L. R. D'Addario, G. I. Langston, A. H. Minter, B. R. Carlson, P. E. Dewdney, D. L. Jauncey, J. E. Reinolds, A. R. Taylor, P. M. McCulloch, W. H. Cannon, L. I. Gurvits, A. J. Mioduszewski, R. T. Schilizzi, and R. S. Booth, "Overview and Initial Results of the Very Long Baseline Interferometry Space Observatory Programme", *Science*, 281, pp.1825, September 1998.
- (3) H. Hirabayashi, H. Hirosawa, H. Kobayashi, Y. Murata, Y. Asaki, I. M. Avruch, P. G. Edwards, E. B. Fomalont, T. Ichikawa, T. Kii, R. Okayasu, K. Wajima, M. Inoue, N. Kawaguchi, Y. Chikada, T. Bushimata, K. Fujisawa, S. Horiuchi, S. Kameno, T. Miyaji, K. M. Shibata, Z.-Q. Shen, T. Umemoto, T. Kasuga, J. Nakajima, Y. Takahashi, S. Enome, M. Morimoto, J. Ellis, D. L. Meier, D. W. Murphy, R. A. Preston, J. G. Smith, R. D. Wietfeldt, J. M. Benson, M. J. Claussen, C. Flatters, G. A. Moellenbrock, J. D. Ronmey, J. S. Ulvestad, G. I. Langston, A. H. Minter, L. R. D'Addario, P. E. Dewdney, S. M. Dougherty, D. L. Jauncey, J. E. J. Lovell, S. J. Tingay, A. K. Tzioumis, A. R. Taylor, W. H. Cannon, L. I. Gurvits, R. T. Schilizzi, R. S. Booth, and M. V. Popov, "The VLBI space observatory programme and the radio-astronomical satellite HALCA", *Publ. Astron. Soc. Japan*, 52, pp.955-965, December 2000.
- (4) H. Kobayashi, K. Wajima, H. Hirabayashi, Y. Murata, N. Kawaguchi, S. Kameno, K. M.; Shibata, K. Fujisawa, M. Inoue, and H. Hirosawa, "HALCA's onboard VLBI observing system", *Publ. Astron. Soc. Japan*, 52, pp.967-973, December 2000.
- (5) H. Kobayashi, T. Shimoikura, T. Omodaka, and P. J. Diamond, "Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI, Proceedings of the VSOP Symposium", pp.109-112., ISAS, 2000.
- (6) H. Hirabayashi, E. B. Fomalont, S. Horiuchi, J. E. J. Lovell, G. A. Moellenbrock, M. Inoue, B. F. Burke, P. E. Dewdney et al. "THE VSOP 5GHz AGN Survey I. Compilation and Observations", *Publ. Astron. Soc. Japan*, 52, pp.997-1014, December 2000.
- (7) Y. Murata, "VSOP/HALCA International Mission Operation", *Advances in Space Research*, 26, pp.603-608, 2000
- (8) K. Asada, S. Kameno, M. Inoue, Z.-Q. Shen, S. Horiuchi, and D. C. Gabuzda, "Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI, Proceedings of the VSOP Symposium", pp.51-54, ISAS, 2000.
- (9) J. E. J. Lovell, S. Horiuchi, G. A. Moellenbrock, Hirabayashi, H. E. B. Fomalont, R. Dodson, S. Dougherty, P. G. Edwards, S. Frey, L. Gurvits, M. Lister, D. W. Murphy, Z. Paragi, B. Piner, W. Scott, Z.-Q. Shen, S. Tingay, M. Inoue, Y. Murata, K. Wajima, B. Carlson, K. M. Shibata, J. Quick, M. Costa, A. Tzioumis, C. Trigilio, J. Nakajima, H. Xinyong, and W. Wei, "Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI, Proceedings of the VSOP Symposium", pp.183-188., ISAS, 2000.
- (10) Papers in H. Hirabayashi, R. A. Preston, L. I. Gurvits edited, *Advances in Space Research*, 26, pp.587-756, 2000
- (11) H. Hirabayashi, P. G. Edwards, D. W. Murphy edited, "Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI, Proceedings of the VSOP Symposium", ISAS, 2000.
- (12) Papers in *Publ. Astron. Soc. Japan*, 52, December, 2000
- (13) H. Hirabayashi, D. W. Murphy, Y. Murata, P. G. Edwards, I. M. Avruch, H. Kobayashi, and M. Inoue, "Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI, Proceedings of the VSOP Symposium", pp.277-280., ISAS, 2000.

- (14) T. Venturi, A. C. S. Readhead, M. J. Marr, and D. C. Backer, "Subparsec-scale radio structure in NGC 1275 - Complex structure in the vicinity of the central engine", *Astrophys. J.*, 411, pp.552-564, July 1993.