

# TDRS 衛星を使ったスペース VLBI 観測

平 林 久

スペース VLBI 実験チーム (宇宙科学研究所, 野辺山宇宙電波観測所,  
NASA ジェット推進研究所, ほか)

(1989 年 1 月 10 日受理)

## Space VLBI using TDRS

By

H. HIRABAYASHI and Space VLBI Experiment Team

**Abstract:** The first space VLBI test experiment using TDRSS (Tracking and Data Relay Satellite System) was done in 1986-1987 with the wavelength of 13 cm. Fringes from 23 radio sources were detected, the maximum projected baseline length of 2.16 earth diameters was realized, and the brightness temperatures exceeding  $10^{12}$  K of inverse Compton limit were detected. The experiment in 1988 with the wavelength of 2 cm also proved successful. These results have much impact on the realization of project VSOP together with recent mm VLBI results.

### 概 要

TDRSS (Tracking & Data Relay Satellite system) を使った、波長 13 cm でのスペース VLBI が、1986 年～1987 年にわたり、人類初のスペース VLBI 実験として行われた。その結果、合計 23 個の電波源のフリッジを検出し、衛星-地上間の最大基線  $2.16 \times$  地球直径を実現、また静止系でのインバースコンプトン効果による限界 ( $10^{12}$  K) を上回る輝度の成分の検出をするなどの結果が得られた。また 1988 年の波長 2 cm (波長 13 cm と同時) でのスペース VLBI 実験にも成功し、スペース VLBI の短波長での実現性の証明をした。地上ミリ波 VLBI と並ぶこの実験・観測による VSOP 計画に対するインパクトは大きい。

### 1. TDRSS-OVLBI 13 cm 波実験

Space VLBI を目指した初の実験が 13 cm 波帯において、TDRS 衛星 (Tracking and Data Relay Satellite) を使用して行われた。

実験の主受信アンテナとして

TDRS 衛星	4.9mφ アンテナ
臼田	64mφ アンテナ
Tidbinbilla	64mφ アンテナ

が使用された。TDRS 衛星の管制、位相ロック、データリンクの為に、ホワイトサンド局が重要な役を担った。VLBI 較正実験の為に、鹿島局、ゴールドストーン局などが参加し、鹿島局は本実験中もレコーディングに参加した。

受信バンドは 2.3 GHz 帯、バンド幅は 14 MHz (2270.99~2284.99 MHz)、偏波は RHCP。レコーディングは Mk III VLBI 観測装置の 2 MHz/track × 7 track = 14 MHz で行われた。

観測には TDRS 衛星の運用上の制限から南天側の電波源が選ばれた。

臼田局を VLBI 局をする為に必要な装置 (Mk II, Mk III 装置, ルビジウム原子時計, その他) は、野辺山から搬入し立ち上げが行われ、観測実験は宇宙研、野辺山宇宙電波観測所の共力で行われた。また感度を上げるため、JPL より受信機 (メーザー) が搬入され、ほぼ 2 倍の性能アップとした。

本実験は 1986 年 7~8 月 (一期) と、1987 年 1 月 (二期) と 2 回行われた。

#### 1-1. TDRSS-OVLBI 実験 (1986) の結果

本実験に先だって 1985 年 12 月に、TDRS 衛星・ホワイトサンド局間で、コヒーレンス実験が行われ、良い見通しが得られていた。即ち、ホワイトサンド局から 2.3 GHz トーンが衛星に送信され、4.9 m アンテナで受信された後に衛星の受信ルートを通り、14 GHz でダウンリンクされて、地上との位相比較が行われた。衛星の軌道情報だけをもとに位相を

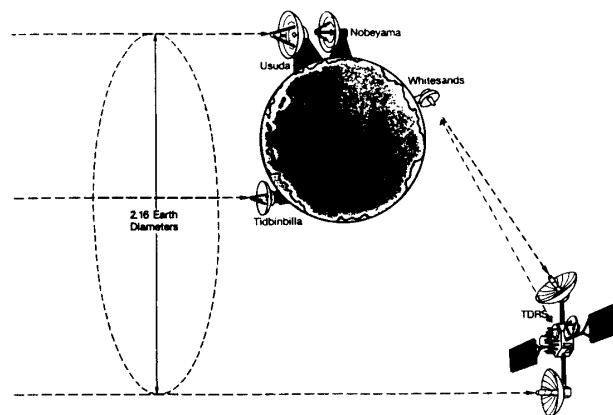


図1 S-band (波長 13 cm) での TDRS-OVLBI 実験の局構成。

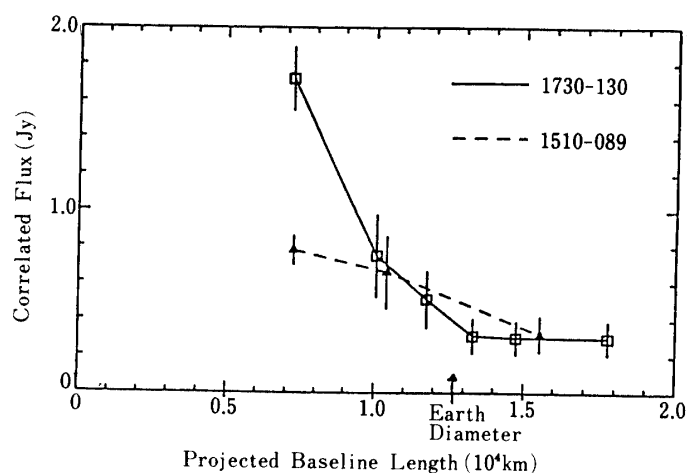


図2 電波源 1730-150 と 1510-089 に対する CORRELATED FLUX

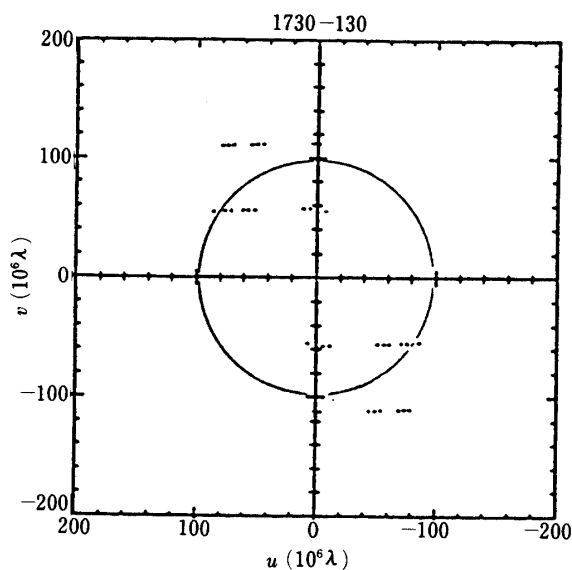


図3 TDRSS-OVLBI 実験での、1730-130 に対する U-V カバーレッジ. 図中、地球直径を半径とする円は、地球規模 VLBI におけるカバーレッジの制限を示す。

修正するのでは、TDRSS-OVLBI 実験にはおぼつかないことが判明した。そこで二系統で同様のことをしてその差をみると、800 秒の積分に対してコヒーレンスが 0.99 と得られた。こうして、地上からビーコン信号をアップリンクし、系を通過してダウンリンクされた信号を位相の補正として使うことで、TDRSS-OVLBI 実験成功の見通しが得られた。コヒーレンス時間が長くとれると、それだけ干渉積分時間が長くとれ、干渉計としての感度がある。

観測の前半は TDRS 衛星のアンテナ・ポインティングに問題があって有効なデータがとれず、1730-130, 1510-089, 1741-038 の三電波源について、有効データが得られた。

図2に電波源 1730-130, 1510-089 に対する干渉縞の振幅(ビジビリティ)のデータを示す。有効データがとれた三電波源に対しては、全てにおいて、地上・宇宙間の干渉縞が得られたが、図2はこのうちの二つの例を示している。

Correlated flux (相関フラックス)の値は、有効なベースライン長に対して単調に減少しており、少なくとも、これからこれらの電波源のサイズの推定が出来る。地上での VLBI 観測の初期の頃は、このようなデータをもとにサイズの推定をするのが普通であった。

観測された最大の有効ベースライン長は 17,800 km, 地上直径の 1.4 倍であった。これは干渉縞間隔にして 1.5 ミリ秒角にあたる。

電波源に対して投影した干渉基線のベクトルの東西方向の成分を U, 南北方向の成分を V とする。開口合成法ではさまざまな (U, V) において、電波源の輝度分布の二次元フーリエ成分を得て、二次元フーリエ変換によって像を得る。従って、できるだけ効率的に (U, V) 面をサンプルしてゆくことが必要である。このサンプルの具合を UV カバーレッジと言う。

図3に 1730-130 に対する UV カバーレッジを示す。サンプル点が少ないことなどから、画像をつくる試みはなされていない。

また電波源 1127-145 に対しては、closure phase の情報も利用して二成分モデルのマップが得られた。コアとジェットと思われる、初のスペース VLBI マップである。

## 2. TDRS-OVLBI 実験(1987)の結果

二期実験は一期実験と全く同じセットアップで行われた。二期実験の特徴は安定に数多くの有効データが得られたことである。25 電波源が観測され、うち 23 について干渉縞(フリンジ)が得られた。二期実験で得られた最大実効ベースライン長は、電波源 1034-293 に

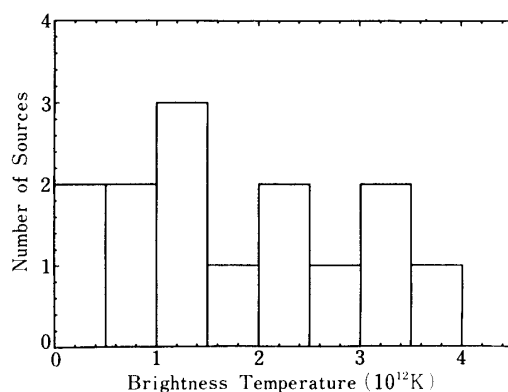


図4 ガウスモデルにより輝度温度の推定のできた電波源の輝度温度のヒストグラム。横軸は逆コンプトンのリミットである  $10^{12}$  K を単位とする。

表1 第II期実験で得られた23個の電波源に対する最大ベースライン長とそのときのビジビリティ, また単一ガウスモデルによる電波源の長半径と短半径, そして電波源の輝度.

電波源名	最大基線長 (地球直径単位)	ビジビリティ (最大基線長 に対して)	長半径 (mas)	短半径 (mas)	輝度温度 ( $10^{12}$ K)
●0048-097	1.50	0.65	0.33	1.38	$(1+z)$
●0336-019	1.37	0.47	0.82	0.33	2.35
●0414-189	1.65	0.53			
●0420-014	1.39	0.65	0.96	0.48	3.30
●0434-188	1.59	0.26			
●0454-234	1.81	0.11	0.94	0.9	
●0723-008	1.31	0.20	1.30	0.35	0.47
●0727-115	1.57	0.13	1.10	0.56	$1.24(1+z)$
●0805-077	1.18	0.46			
●1034-293	2.15	0.32	0.42	0.76	$(1+z)$
●1124-186	1.60	0.26	0.74	0.25	$(1+z)$
●1127-145	1.64	0.32			
●1145-071	1.35	0.18	1.09	0.41	
●3C 279	1.36	0.33	2.15	0.71	1.6
●1335-127	1.69	0.17	1.21	0.45	1.45
●1504-167	1.70	0.33			
●1519-273	2.02	0.68	0.33	3.4	$(1+z)$
●1741-038	1.47	0.34	1.24	0.84	$0.48(1+z)$
●1921-293	2.07	0.15	0.55	3.8	
●1958-179	1.44	0.64	0.55	2.2	
●2216-038	1.23	0.50	0.49	3.4	
●2223-052	0.94	0.13			
●2345-167	1.69	0.13	1.08	0.44	1.0

対し地球直径の2.15倍であった。

表1に23電波源に対するそれぞれの最大効果ベースライン長とそれに対するビジビリティ, 電波源を単一のガウスモデルでフィッティングした時の電波と短軸の半径, またおおよその輝度温度を示す。

放射の理論面からはコンプトン限界による輝度温度の上限 ( $10^{12}$  K) が示唆されているが, 得られた輝度温度の多くはこの上限値より大きい。相対論的スピードで観測者に向かって運動する放射領域によるビーミング効果ははっきりあらわれていると考えることができる。ここで観測された電波源の芯のエネルギー源は回転する巨大なブラックホール (降着円盤) と考えられている。このあたりは将来のスペース VLBI と後述のミリは VLBI とではっきり結着をつけたい問題である。

### 3. 2 cm TDRS-OVLBI(1988)の結果

15 GHz (波長 2 cm) での TDRS-OVLBI 実験が, より高い周波数に挑戦する実験として

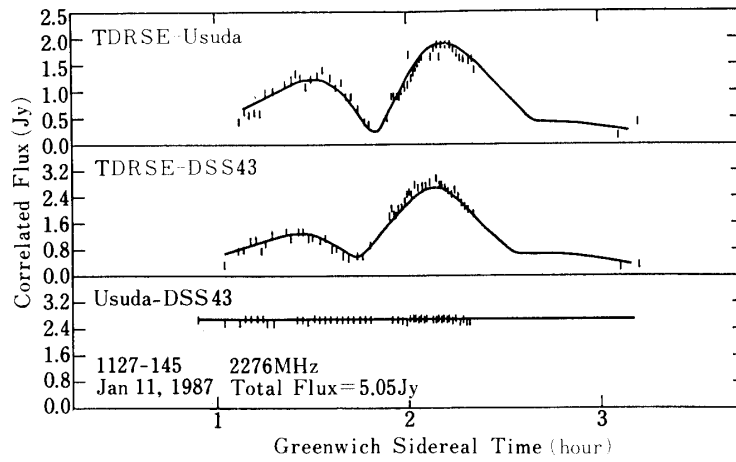


図5 電波源 1127-145 に対する干渉縞の振幅を観測時角でプロットしたもの。実線は図6の二成分ガウスモデルに対するフィッティング・カーブ。

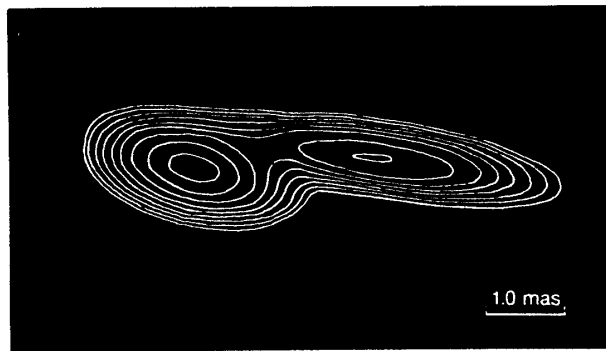


図6 図5の観測によくあうクエーサー 1127-145 の二成分電波像。スペース VLBI における初の電波像といってよい。

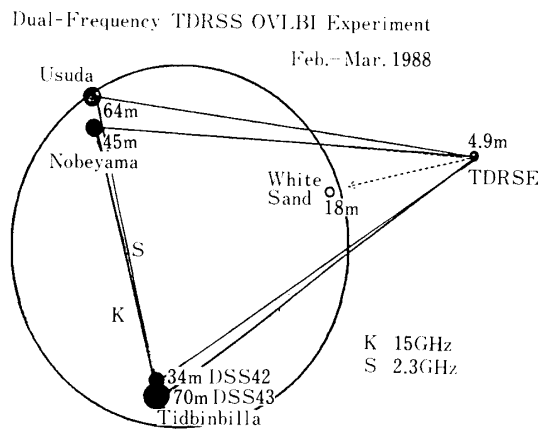


図7 2 cm, 13 cm 波同時実験における局配置。

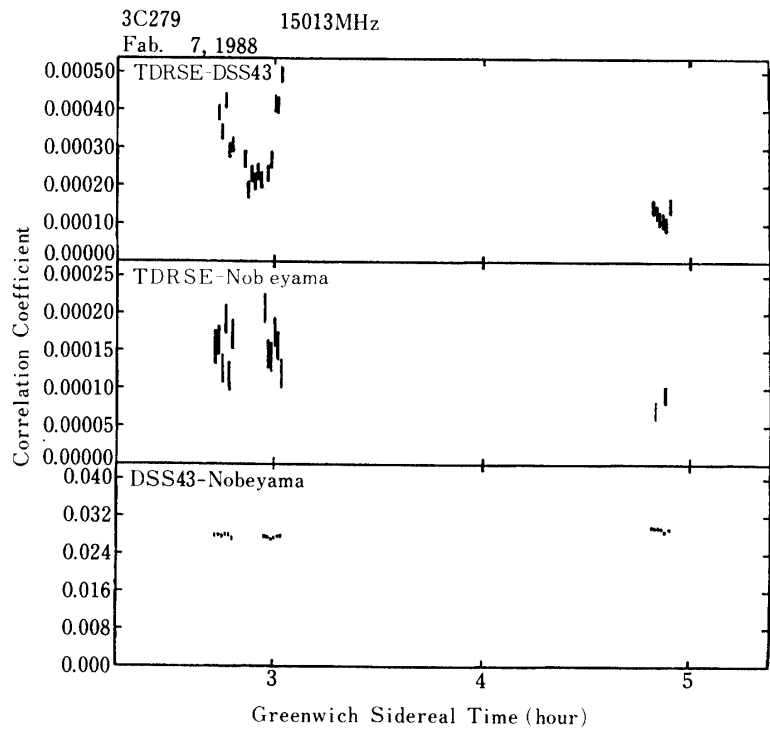


図8 3C279 に対する三局ペアのフリンジ振幅を hour angle でプロットしたもの、3C279 のコンパクトな構造に伴う変化がはっきりみえる。

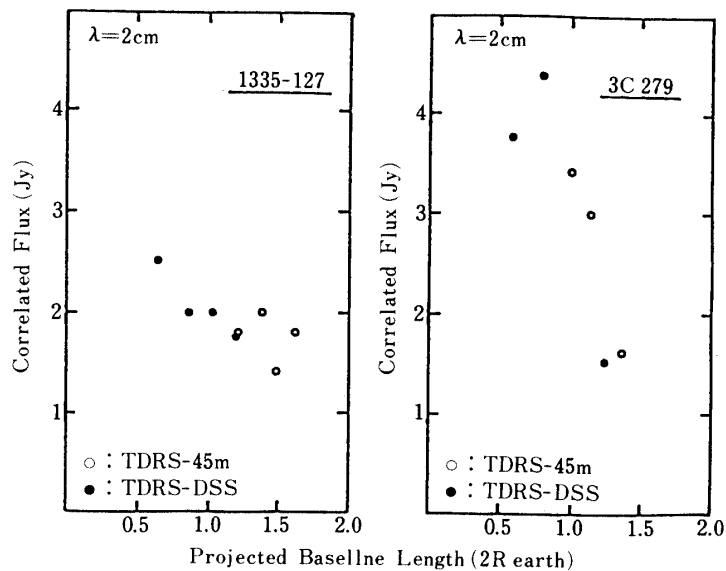


図9 電波源 1335-127 と 3C279 に対する実効基線長に対するフリンジ振幅。3C279 の方が 1335-127 にくらべて拡がった構造であることがみてとれる。

計画され、観測は1988年2月～3月の6セッションにわたって行われた。

参加局はTDRS衛星(4.9 m)、野辺山(45 m)、ティディンビラ(70 m)の3局で、野辺山はこの実験のために、VLBI仕様のヘリウム冷却HEMTを、ティディンビラはVLBA-Pie Townの冷却受信機を借用した。レコーディング・バンド幅はMk-III仕様の4 MHz/track×22 track=88 MHzとして高感度化をはかった。また、全実験にわたって2.3 GHz帯(波長13 cm)での同時観測も行い、このために臼田局64 m鏡も参加し、ティディンビラでは34 m鏡(DSS 42)により受信した。バンド幅は、4 MHz/track×6 track=24 MHzとした。

今回は運用上の制限がとれ、北天の電波源も含む23電波源が観測された。このうち11電波源について干渉縞が得られた。波長13 cmに較べて検出の割合が約半分であるが、これは観測感度の劣っていることで説明できる。

図9に、観測された二つの電波源(3C 279, 1335-127)に対するビジビリティを示す。図示しないが、3C 273については更に複雑なビジビリティ・カーブが得られている。

観測周波数が6.5倍になり、分解能0.1ミリ秒台による高輝度成分の検出・マッピング

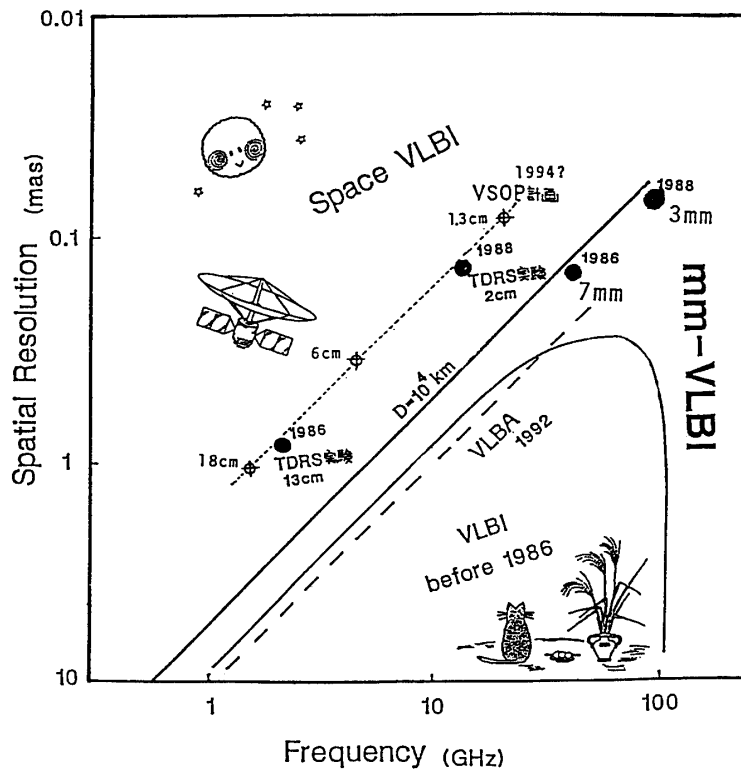


図10 VLBIにおける観測周波数と空間分解能。

1986年より1988年の前にスペースVLBIとミリ波VLBIで大きな進展がみられた。このうち13 cm波と2 cm波のTDRS実験がスペースVLBIの歴史の1ページと2ページをかざるものであり、7 mm波と3 mm波は長基線ミリ波への巨大ステップであった。



などの成果が期待される。二周波同時によるスペクトル情報は、電波源の放射メカニズムを探る上で大変興味深く、これは今までの VLBI で行われなかったことである。

#### 4. TDRSS-OVLBI 実験の意義と今後

TDRSS-OVLBI 実験によって、人工衛星を用いた VLBI の実現性が実証された。TDRS は元来データリレー用通信衛星であって、VLBI を目指したものではないので、利用時間、アンテナサイズ、受信機性能、鏡面精度、発振精度、クロック等の点で充分でなく、この実験によってキューサーの芯の構造をみるといった科学的成果は十分には期待されない。しかし人工衛星を用いた VLBI 実験に初めて成功した点で大きな意義があり、特に搭載クロックの同期と位相ロックについて地上局からの交信でも出来ると言う点で明るい見通しを得た意義は大きい。

Radioastron と日本の VSOP の両者とも、 $\text{H}_2\text{O}$  メーザー源の観測により、その固有運動からの距離の測定、銀河回転などの新しい分野が開ける。その為にも、15 GHz 帯という高周波帯での実験により、技術的な見通しを得たことは重要と考えられる。

TDRS による観測と VSOP 計画では実効最大ベースライン長、観測波長帯が同程度であるので VSOP 計画実現へのインパクトが大きい。また、この実験は国外レベルでも国内レベルでも大きな組織が組み込まれて成功したので、こうした実験に必要な国際協力の問題への明るい展望を与えた。

#### 5. TDRS 観測、VSOP 計画とミリ波 VLBI

近年、45 m 電波望遠鏡の参加によって 7 mm (1986) と 3 mm (1988) での地球規模 VLBI が可能となってきた。比較的近傍 (2.6 億光年) のセイファート電波銀河 3C 84 では 1 光月ぐらいの分解能で、降着円盤と直交する長大ジェットを思わせる構造がみえてきた。ミリ波での分解能が 100 マイクロ秒前後であるので、TDRS や VSOP から得られるマップと同じかそれ以上の分解能で多周波の画像をつきあわせることができる。キューサーや AGN (Active Galactic Nuclei) では、その芯がコンパクトでミリ波帯で光学的に薄くなってくるので、ミリ波 VLBI でその姿をあらわしてくる。VSOP ではキューサーや AGN の芯を解明し長大なジェット現象を解明することも重要なターゲットであるので、ミリ波 VLBI で地上観測を進めてゆくことも大変重要である。

TDRS 衛星を使った人類初のスペース VLBI (TDRSS-OVLBI Demonstration Experiment) が「第 0 世代のスペース VLBI」であるとするならば、VSOP はいわば本格的スペース VLBI 時代の幕開けを告げる「第一世代のスペース VLBI」である。TDRSS-OVLBI 実験でさえも多大な技術的・学問的成果を上げた。Space VLBI をめざして設計された VSOP では、更に多大な成果を上げることが期待できる。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] G. S. Levy et al., Science, vol. 234, 187, 1976, Very Long Baseline Interferometric Observation Made with an Orbiting Radio Telescope.
- [ 2 ] H. Hirabayashi, proc. of IAU symposium on the Impact of VLBI on astrophysics and geodynamics, Cambridge, PP 449-456, May 1987.