

V-1 K-3 型観測システムの総合評価

川口 則幸*

(昭和59年7月3日受理)

1. はじめに

電波研究所では昭和54年度より超高精度な K-3 型 VLBI システムの開発をすすめ、昭和58年9月に完成させた。本システムの機能・性能の詳細は、本特集号の II, III, IV で詳しく述べられているが、そこで述べられている各装置を組合わせた VLBI 観測局としての総合性能を確認するために、史上初の日米間 VLBI 試験観測が昭和58年11月に実施された。

この結果、K-3 型 VLBI システムはその観測システム、相関・一次処理システム、データ解析ソフトウェアのすべてにわたってほぼ当初予定した通りの機能・性能を有することが分った。またいくつかの問題点も明らかにすることができ、それらの問題に早日に対処することにより、その後昭和59年の1月と2月の2回にわたって実施された日米間 VLBI システムレベル実験を円滑に進めることができた。更には、昭和59年7月から9月にかけて実施が予定されている日米間 VLBI 本実験に向けて貴重な経験と基礎データを積み重ねることができた。

本稿ではこの試験観測の結果を K-3 型観測システムの総合性能評価の観点から論じ、その特性を明らかにするとともに今後の課題等について述べる。

2. 日米試験観測スケジュール

日米試験観測は昭和58年9月の K-3 システムの完成をみて同年11月4日に第1表のスケジュールに従い実施された。実験は約2時間半にわたって行われ、3個の電波源(3C273b, 4C29.25, 3C345)が延べ6回にわたって観測された。各観測において、8GHz帯8チャンネル、6GHz帯6チャンネル、計14チャンネルのビデオ帯信号(各信号の帯域幅2MHz)を12分間データレコーダに記録した。レコーダは28個の記録トラックを持っているので、6回の観測データを3巻の磁気テープに往復記録した。観測周波数その他の観測パラメータを第2表に示す。

観測に参加した局は、日本側は26mアンテナと K-3 VLBI システムを有する鹿島局、米国側は12mアンテナ

第1表 日米 VLBI 試験観測のスケジュール

Obs.No.		Time(UTC)	観測時仰角		
			鹿	島	OVRO
1	4C39.25	2000-2012	76°	27°	25°
2	3C273b	2040-2052	31°	34°	33°
3	3C345	2110-2122	10°	83°	83°
4	3C273b	2140-2152	41°	22°	22°
5	3C273b	2201-2213	45°	18°	18°
6	3C345	2222-2234	21°	82°	80°

を持つモハービ VLBI 基地局(以下「MBS」もしくは「MOJAVE」と略称する)及び40mアンテナを持つオーエンスバレー電波観測局(以下「OVRO」と略称する。)の3局で、米国側で使用された VLBI システムはすべて Mark-III 型となっている。これらの観測局の位置関係を第1図に示す。第1図は、地球を真北から見たもので、日米間を結ぶ基線はほぼ東西方向で、基線長約8000kmのまきに超長基線電波干渉計という名に恥じないものになっている。参加各観測局を結ぶ基線のパラメータを第3表に示す。表中の基線赤緯(δ_B)は、基線ベクトルと赤道面のなす角、基線時角(L_B)は、基線ベクトルと基準局位置ベクトル間の時角であり、電波源の方向ベクトルとともに赤道面に投影した各ベクトルの位置関係を第2図に示す。

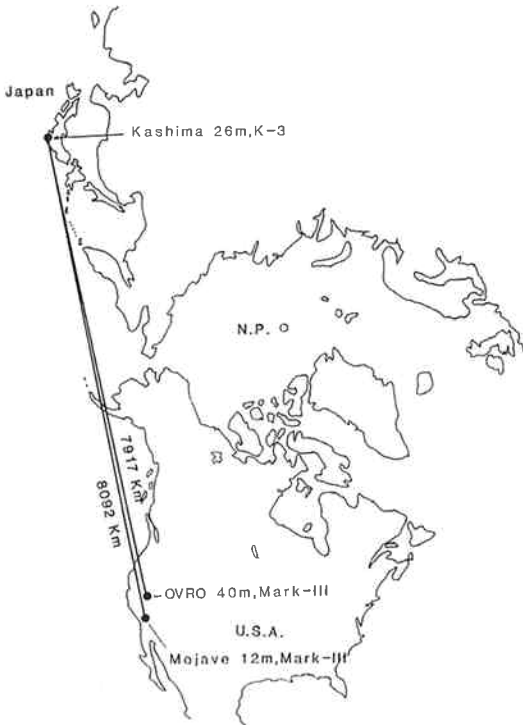
本試験観測の主目的は、完成直後の初めての大陸間 VLBI 実験において K-3 システムが当初目標通りの性能を発揮するかを調べることにあった。そこで観測後データは鹿島局とヘイスタック局(以下「HAYS」と略称される)に送られ、双方で相関検出作業が実施された。HAYS 局は、最近まで Mark-III 型相関処理装置を持つ唯一の局として長年相関処理を担当し、実績をあげてきている。従って、実績のある相関処理装置で正しく相関が検出されれば、少なくとも K-3 VLBI 観測システムは、米国側の Mark-III システムとの整合性も含めて期待通りの性能を発揮したと言える。

また、日米双方で相関処理を行えば、両者の結果を比較することにより、完成して間もない K-3 型相関処理システムの性能もチェックできる。特に日米本実験では

* 鹿島支所 第三宇宙通信研究室

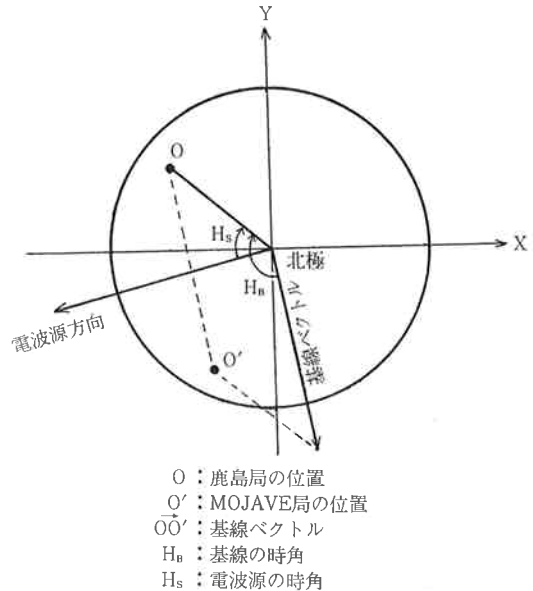
第2表 日米 VLBI 試験観測の観測パラメータ

観測パラメータ	観測周波数	8 GHz 帯	2 GHz 帯
観測周波数		8210.99 MHz (0)	2217.99 MHz (0)
		8220.99 (+10)	2222.99 (+5)
		8250.99 (+40)	2337.99 (+20)
		8310.99 (+100)	2367.99 (+50)
		8420.99 (+210)	2292.99 (+75)
		8500.99 (+290)	2302.99 (+85)
		8550.99 (+340)	
		8570.99 (+360)	
バンド幅合成チャンネル数: M		8	6
観測中心周波数: f		8389.74 (+168.6)	2257.16 (+39.2)
バンド幅合成等価帯域幅: f_{rms}		140.2 MHz	33.1 MHz
バンド幅合成精度改善率		687	140
1チャンネルの帯域幅 B		2 MHz	2 MHz



第1図 日米 VLBI 試験観測の参加局

膨大な生データの相関処理を日米双方で分担処理することになっているので、この処理結果の日米比較は特に重要である。



第2図 赤道面に投影した基線ベクトルと基線の時角

日米 VLBI 本実験の56時間や30時間という長時間連続観測に比較し、今回の試験観測では2時間30分という短時間であったにもかかわらず、観測に当ってはまず観測スケジュールを作成し、自動運用ソフトウェア (『KAO S』, II-13 参照) がこのスケジュールに従い全 K-3 システムの制御を行って観測を実施するという、まさに本実験時と同様の手順で実施された。

第3表 日米 VLBI 試験観測の基線パラメータ

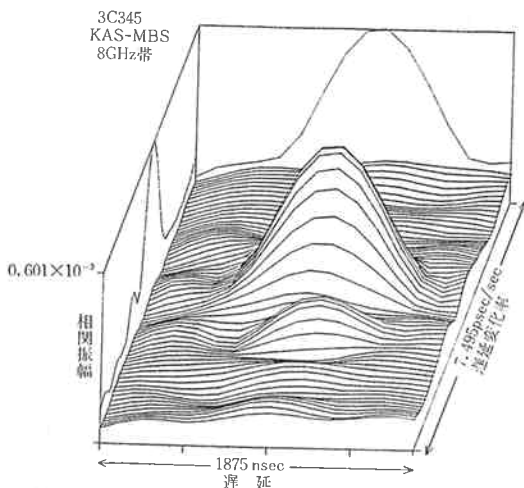
基線名	基線長	基線赤緯	基線時角
KASHIMA-OVRO	7916.743 km	0.83°	-140.91°
KASHIMA-MBS	8091.824 km	-0.39°	-141.04°
MBS-OVRO	245.272 km	43.92°	-224.49°

3. 日米 VLBI 試験観測結果

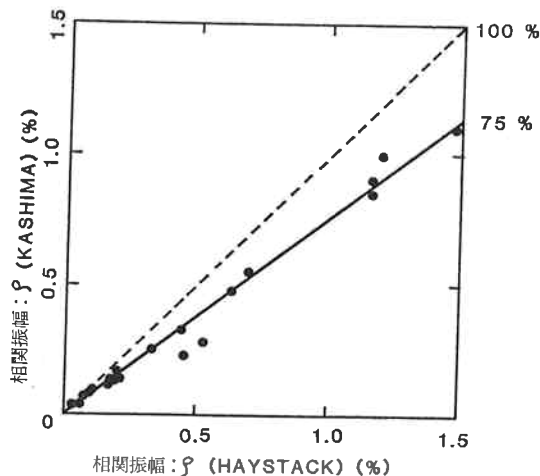
第3図に K-3 型相関・一次処理システム（本特集号 III 部を参照）により検出された相関の1例を示す。この図は遅延とその時間変化率に対する相関振幅の変化を三次元的にプロットしたもので、相関振幅を最大にする遅延及び遅延変化率、及びこの時の最大相関振幅がVLBIにおける観測量になる。第3図は KAS-MBS 基線で3C345を8GHz帯で観測した例であるが、この図と同様に、非常にS/Nの良い相関の山がすべての基線、及び電波源につき2/8GHz帯周波数帯での観測で検出された。

米国側の Mark-III 相関処理システムでも相関の検出に成功し、日米両処理システムで検出された相関振幅が比較された。この結果を第4図に示す。

図から明らかのように両者の結果は2、3の例外を除けばほとんど一直線上に並んでいる。つまり電波源の強弱による相関振幅の変化は両システムとも忠実に反映しており、K-3 型相関・一次処理システムの基本的相関検出のアルゴリズムは正しいことが証明された。ただ図から明らかのように、日本側の処理結果は米国側のそれと比べて一定係数（約3/4）だけ小さくなっている。一定係数だけ異なるということから、この違いの原因はおそ



第3図 K-3 型相関・一次処理システムで検出された相関例（組合成結果）



第4図 日米相関処理結果の比較

らく両相関処理システムでの規格化定数の採用値が異なっているものと思われる。ただ第4図だけからは、日本側が小さいのか、それとも米国側が大きいのかは識別できない。そこで電波源の強度から直接相関振幅を算出する事を試みた。

4. 電波源強度と相関振幅の予測

II-1 に詳しく述べられているように、相関振幅 ρ と電波源 S_c の間には次の関係が成り立つ。

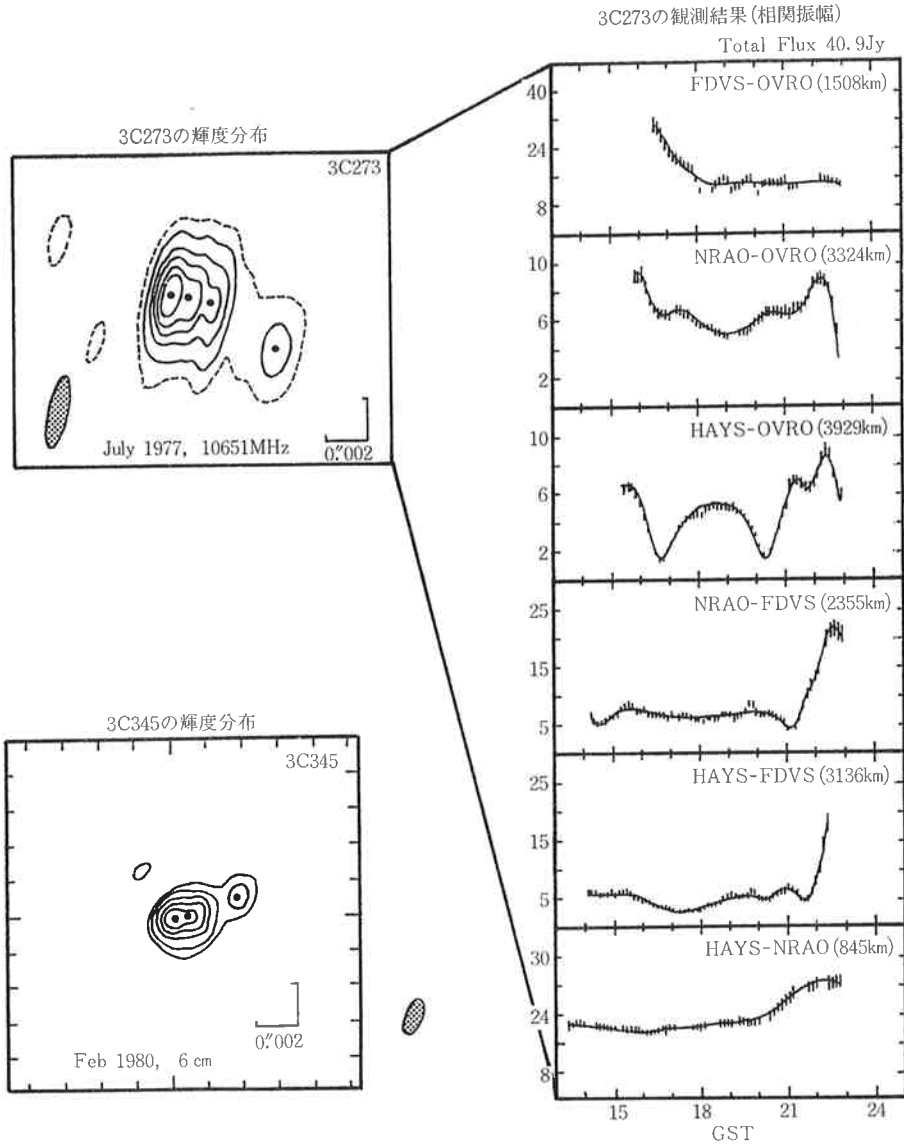
$$\rho = \frac{\pi S_c}{8k} \left(\frac{D_1 D_2 \sqrt{\eta_1 \eta_2} L_c}{\sqrt{T_{s1} T_{s2}}} \right) \dots\dots(1)$$

ここで右辺 () 内はシステムの性能に関するパラメータで、

- S_c : フラックス強度 ($W/m^2/Hz$)
- k : ボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23} W/K/Hz$)
- D_1, D_2 : 2局のアンテナ開口径 (m)
- η_1, η_2 : 2局のアンテナ開口能率
- T_{s1}, T_{s2} : 2局の受信系雑音温度
- L_c : コヒーレンスファクタ

となっており、 S_c を除くすべての値はII-1に相関検出感度として算出されている。ただし、II-1の第3表では、2局で使用しているシステムが同等の場合を想定しているの、アンテナ開口径等が異なるシステム間の相関検出感度は各々の値の相乗平均をとる必要がある。

従って電波源の強度が分れば相関振幅が推定できる。しかし、日米間8000kmもの超長基線での観測になると、その8GHz帯における角度分解能は1ミリ秒角にも達し、数ミリ秒角内に電波放射域が限られているといわれる点状電波源準星ですら分解されて、複雑な強度変化を示すようになる。



第5図 3C273の観測例及び3C273と3C345の電波源分布

第5図にこの強度変化の一例を示す。第5図は10GHz帯での3C273のVLBI観測結果⁽¹⁾であるが、HAYS-OVROという米大陸の東西を結ぶ最長約4000km足らずの基線ですら分解されて複雑な強度変化を示す(図中上から3番目)。各基線で見た強度変化から逆に電波源の微細構造が推定されるが、第5図にはこのようにして得られた3C273の強度分布が示されている。この図から明らかのように3C273は4個の点状電波源の集合とみなすことができる。また同図中に3個の点状電波源から成るとされる電波源3C345の構造も示す⁽²⁾。

このように日米間といった超長基線での観測では無視できない拡がりを持った電波源でも、複数個の点状電波

源の集合として正しくモデル化してやると、この強度変化をある程度予測できるようになる。

今回の試験観測で用いられた電波源、4C39.25、3C345、3C273bに対し、過去の観測結果から得られた第4表の電波源モデルに基づいて観測時刻における電波源強度の計算を行った。この結果は第5表の S_e の欄に単位 $J_y(\text{Watt}/\text{m}^2/\text{Hz})$ で示されている。

こうして電波源の強度が明らかになったので、(1)式及び各参加局の相関検出感度を使って相関振幅の計算値が得られる。この結果は第5表の ρ_{calc} の欄に示されている。各参加局の相関検出感度のうち、鹿島局のものは、実験前の各試験データ(本季報II参照)から算出され、

第4表 電波源の強度計算に採用した輝度分布モデル

source	freq.	source flux and size	source position	reference and comment
4C39.25	8.4 GHz	$S_a=4.22$ Jy $FWHM_a=0.56$ mas $S_b=3.88$ Jy $FWHM_b=1.12$ mas $S_c=1.14$ Jy $FWHM_c=0.38$ mas $S_T=9.51$ Jy	Offset _b =0.22 mas PA _b =153 deg Offset _c =2.01 mas PA _c =-84.3 deg	Baath et al., Astr. Ap., 86, 346, 1980, (7.85 GHz, 1972. 29-1975. 04)
	2.3 GHz	$S_a=3.64$ Jy $FWHM_a=1.1$ mas		S_a : "A" source flux at 2.3GHz by Shaffer et al., Ap. J., 218, 353, 1977 $FWHM_a$: "A" source size at 5 GHz by Pearson et al., Ap. J., 248, 61, 1981
3C345	8.4/2.3 GHz	$S_a=3.66$ Jy $FWHM_a=0.20$ mas $S_b=1.25$ Jy $FWHM_b=1.0 \times 0.75$ mas (PA 22 deg) $S_c=0.57$ Jy $FWHM_c=0.90$ mas	Offset _b =1.25 mas PA _b =-95 deg Offset _c =4.0 mas PA _c =-71 deg	Spencer et al., Ap. J., 251, L 61, 1981 (5.0 GHz, Feb. 1980)
3C273b	8.4/2.3 GHz	$S_a=15.1$ Jy $FWHM_a=0.6$ mas $S_b=10.9$ Jy $FWHM_b=0.9$ mas $S_c=7.1$ Jy $FWHM_c=0.9$ mas $S_d=8.8$ Jy $FWHM_d=0.4$ mas $S_T=41.9$ Jy	Offset _b =1 mas PA _b =-99 deg Offset _c =2 mas PA _c =-99 deg Offset _d =6 mas PA _d =-117 deg	Calculated from the Hybrid Map of 3C273 by Readhead et al., Ap. J., 231, 1979 (10.651 GHz, Jul. 1977)

mas : milli arc second PA : Position Angle

米国局のものは文献(3), (4)に基づく試験データを参照した。また第5表の *Latm* の欄で示される対流圏の位相シンチレーションによるコヒーレンスロスファクタは、湿度が高く位相シンチレーションが大きいと思われる鹿島局のみの場合を考慮に入れ、位相揺らぎの大きさ、揺らぎのスペクトルは河野らによる鹿島一平磯間 VLBI 実験で得られたデータ⁽⁵⁾に基づき、川口によって与えられた計算式⁽⁶⁾を使って計算された。また第5表の *Lsys* の欄で示される VLBI 観測システムのコヒーレンスファクタは川口による見積もり値⁽⁶⁾に一部実測データ(本季報 II-4, II-5 参照)を取り入れた値を採用している。

第5表にはこの計算値に対し、K-3 型相関処理・一次処理システムで実際の観測データから検出された相関振幅 ρ_{obs} が並記されており、計算値に対する観測値の割合が最右欄に掲げられている。

5. 日米試験観測の結果と K-3 型観測システムの総合評価

4. で得られた最終結果をバークラフにして第6図に示す。

図から、MBS-OVRO という米国内短基線(距離約 250km) のものを除いた日米間基線では、観測によって得られた相関振幅の大きさは、計算値に対して約 3/4 になっていることが分る。また 3. で述べたように、K-3 型相関処理・一次処理システムで得られたこの相関振幅は平均すると約 3/4 だけ HAYS 局の処理結果よりも小さくなっていた。

以上の結果を総合すると次の事が推論される。

- (1) 鹿島局の K-3 型相関処理・一次処理システムは、一定係数 3/4 だけ小さく出力する。これは相関振幅の規格化定数の違いと思われる。
- (2) HAYS 局の処理で得られた相関振幅が、比較的予測計算値と良く一致することから、K-3 型観測システムは、予測通りの性能を試験観測時に発揮した。

上記第一項に関してはただちに調査が開始され、相関処理ソフトウェアの手直しが行なわれた。改修されたソフトウェアを用いてその後 2 回にわたって実施された日米システムレベル実験(昭和59年1月及び2月に実施)のデータを処理したところ、日米間の処理結果が良く一致することが分った。ただフリンジ回転速度の早い 8 GHz

第5表 日米 VLBI 試験観測結果と予測計算値

observation time (UTC)			$S_c(\text{Jy})$	ρ/S_c	L_{atm}	L_{sys}	ρ_{calc}	ρ_{obs}	obs/calc (%)	
#-0400-0600	3C273	2.3 GHz	K-G	42	6.86E-5	.968	.439	1.22E-3	0.95E-3	78
#-2000-2200	3C84	2.3 GHz	K-G	21	6.86E-5	.968	.439	0.61E-3	1.18E-3	193
#1 2000-2012	4C29.25	8.4 GHz	K-M	1.7	5.62E-4	.949	.487	4.42E-4	3.0E-4	68
			K-O	1.6	9.59E-4	.949	.487	6.91E-4	4.3E-4	62
			M-O	9.5	5.25E-4	1.0	.487	2.42E-3	1.4E-3	58
	2.3 GHz	K-M	2.9	4.51E-4	.987	.536	6.97E-4	6.5E-4	93	
		K-O	2.7	12.2E-4	.987	.536	1.74E-3	1.5E-3	86	
		M-O	3.6	7.18E-4	1.0	.536	1.40E-3	2.2E-3	157	
#2 2040-2052	3C273b	8.4 GHz	K-M	3.7	5.71E-4	.917	.487	0.93E-3	0.68E-3	73
			K-O	4.0	9.86E-4	.917	.487	0.18E-2	0.10E-2	56
			M-O	41	5.48E-4	1.0	.487	1.1E-2	0.94E-2	85
	2.3 GHz	K-M	7.0	4.57E-4	.984	.536	0.17E-4	0.10E-2	59	
		K-O	7.3	12.2E-4	.984	.536	0.47E-2	0.20E-2	43	
		M-O	42	7.28E-4	1.0	.536	0.16E-1	0.15E-1	94	
#3 2110-2122	3C345	8.2 GHz	K-M	3.1	5.76E-4	.825	.487	7.17E-4	4.1E-4	57
			K-O	3.0	9.39E-4	.825	.487	1.14E-3	0.85E-3	75
			M-O	11	5.27E-4	1.0	.487	2.82E-3	4.1E-3	145
	2.3 GHz	K-M	5.4	4.63E-4	.975	.536	1.32E-3	1.2E-3	91	
		K-O	5.4	11.7E-4	.975	.536	3.32E-3	2.8E-3	84	
		M-O	9.5	7.06E-4	1.0	.536	3.56E-3	4.7E-3	132	

K-G : Kashima-GSI, K-M : Kashima-Mojave, K-O : Kashima-OVRO, M-O : Mojave-OVRO

帯で依然として小さ目に出る傾向が見られ、現在更に検討を進めている。いずれにしろ、昭和59年7月からスタートする日米本実験を前にして、問題点の早期発見、早期対処が行えたということは、本試験観測の成果の一つとして数えられるであろう。

上記第二項は、K-3型観測システムの相関検出感度が、本特集号 II-1 で予測された通りのものであることを意味し、今後5ヶ年間に上継続される日米 VLBI 本実験において鹿島局が十分その役割りを果せることが分った。

また第6図からは次の問題点も指摘することができる。

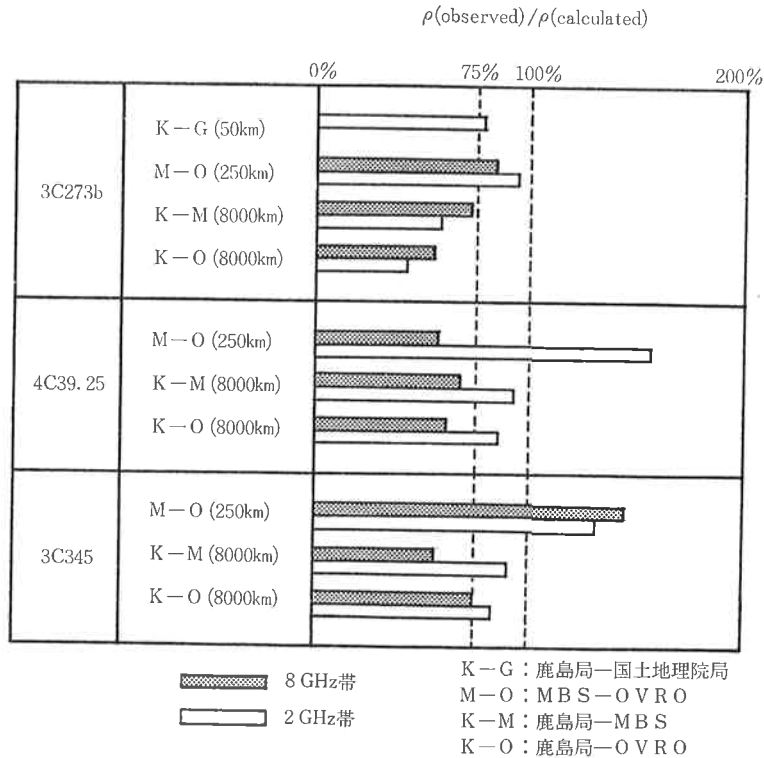
- (1) 米国内の短距離基線 (MBS-OVRO; 250 km) の相関強度が計算値と良く合わない。
- (2) 日米間の長距離基線 (鹿島-MBS, 鹿島-OVRO;

8000 km) の相関強度は、一定係数 3/4 を除くと比較的良く一致するが、分解能のより高い 8 GHz帯の観測が 2 GHz帯より小さ目に出ている。

上記2つの問題点はいずれも電波源の構造にかかわる問題であり、しかも日米間等の超高分解能観測例が比較的少ない事もあって、今後に残された課題であると言える。特に、半ば分解された電波源の観測では、その微細構造に起因する系統的遅延変化も生じるので、単に相関振幅の解析という電波天文学的観点だけでなく、遅延観測に基づき観測局の位置等を求める位置天文学、測地学的観点からも見直されることが望まれる。

6. おわりに

本稿では、本特集号 II で詳細に述べられている K-3 型 VLBI 観測システムの性能から予測される相関の大き



第6図 相関振幅の観測値と計算値の比較

さを、日米 VLBI 試験観測で実際に得られたものと比較し、K-3 型 VLBI 観測システムの総合性能指数となる相関検出感度の確認を行った。

この結果、K-3 型 VLBI 観測システムが予測通りの性能を持つことが明らかになり、今後の日米本実験において期待される遅延決定精度 100 ピコ秒 (光が 3 cm 進む時間) が十分得られるであろうことが実証された。

このような好結果が今回の試験観測で得られたのも、日頃御指導、御鞭達をいただいている若井電波研究所長を始めとする所内幹部の方々、計画を進めるにあたって多くの御援助をいただいている周波数標準部、企画部、総務部を始めとする所内関係各位の御協力のたまものと深く感謝致します。

また、今回の試験観測及びその準備に際し、米国航空宇宙局本部、ゴダード宇宙飛行センター及びヘイスタック観測所並びに建設省国土地理院の VLBI グループから多大の御援助をいただきました。各機関の担当者の皆様へ深く感謝致します。

参 考 文 献

(1) Readhead A.C.S., Pearson, T.J., Cohen, M.H.,

Ewing, M.S. and Moffet, A. T.; "Hybrid Maps of 3C120, 3C273 and 3C345", *Ap. J.*, vol. 231, pp. 299—306, July 1979.

(2) Spencer, J.H., Johnston, K.J., Pauliny-Toh, I. I. K. and Witzel, A.; "A Complex Picture of 3C 45", *Ap. J.*, vol. 251, pp. L61-L63, December 1981.

(3) Shaffer, D.; "OVRO 130' Performance with the Dual S/X Receiver", private communication, March 1984.

(4) Shaffer, D.; "S- and X-Band Performance of the Mojave VLBI Base Station", private communication, August 1983.

(5) Kawano, N., Takahashi, F., Yoshino, T., Koike, T., Kumagai, H. and Kawajiri, N.; "Development of Real-Time VLBI System and Measurements of Scintillation", *J. Radio Res. Lab.*, 29, 127, p. 53, July 1982.

(6) Kawaguchi, N.; "Coherence Loss and Delay Observation Error in Very Long Baseline Interferometry", *J. Radio Res. Lab.*, 30, 129, p. 59, March 1983.