

鹿島 VLBI 観測局と K-3 型 VLBI システム

川口 則幸*・杉本 裕二*

1. はじめに

電波研究所では昭和 51 年に K-1 型 VLBI** システムを完成させ初めての国内 VLBI 実験に成功した後、昭和 54 年には実時間 VLBI システム、K-2 を完成し、広帯域バンド幅合成を実時間で行うことで高精度な遅延時間決定技術を確立した。これらの基礎実験の成果を踏まえて昭和 54 年から 5 ケ年計画で、測地・位置天文、電波天文や深宇宙探査船の軌道決定と幅広い要望に応じた超高精度 VLBI システム、K-3 の開発を行った。

K-3 システムは、米国で開発した最新の VLBI システム、Mark III システム、と完全な整合性を持っており最大で 14 の周波数チャンネルのデータの取得が可能である。この K-3 システムの開発と並行して、かつては銀河電波のサーベイにも用いられた鹿島 26 m アンテナ・受信系が大幅に改造され、鹿島局は新たな VLBI 観測局として生まれ変わり、現在では国際 VLBI 観測網の中の重要な固定基準点の 1 つとして活躍している。ここでは、鹿島 VLBI 観測局について、主に K-3 型 VLBI システムを中心にして紹介を行なう。

2. K-3 型 VLBI システム

VLBI 観測では、遠く離れた観測局でそれぞれ独立に同一電波源を同時刻に観測し、データを高密度データレコーダで記録する。記録されたテープは一ヶ所に集められ、そこで相関処理を行い各観測局への電波の到達時刻差（遅延時間）を高精度で求める。この遅延時間や相関の大きさなどを使って観測局間の距離やその他の各種物理量を決定する。通常の 24 時間観測では、約 15 個の電波源が次々と切り換えられ、約 150 回観測される。

従って、各観測局のデータ収集システムは観測期間中同一のスケジュールに従って制御され、同一の形成のデータをテープ上に記録しなければならない。K-3 型 VLBI システムは、米国の Mark III システムと完全な整合性を持っており、同一のスケジュールファイル（フロッピーディスクの形で各観測局に送られる）に従って動作する。

K-3 型 VLBI システムは以上のデータ収集システムだけでなく、K-3/Mark III タイプの観測生データを相関処理するシステム、相関処理によって得られた遅延時間から各種物理量を求める膨大なソフトウェア群やデータベース等からなる。つまり K-3 型 VLBI システムを備えた鹿島局は、観測計画の立案から観測の実施、相関処理からデータの解析まで VLBI の一連の作業がすべて行える世界でも唯一の VLBI 局になっている。

2-1 K-3 型データ収集システム

図 1 に K-3 型データ収集システムの信号処理部の外観を示す。アンテナ・受信機から送られてきた広帯域の信号はここで 12 のビデオ帯信号に変換され、1 ビットサンプリングされる。データは時刻符号や同期用信号とともに一定の様式で配列される。ビデオ帯への周波数変換には、水素メーザ原子周波数標準器からの基準信号が用いられ、時刻符号はセシウム型原子時計の 1 秒パルス

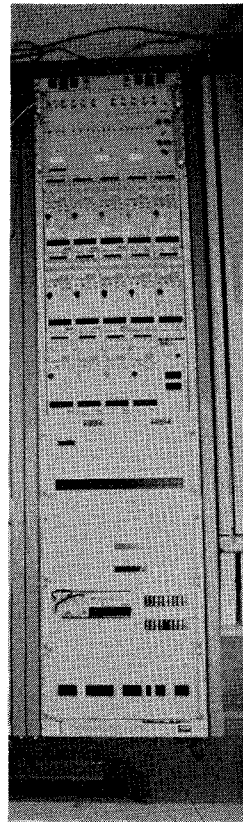


図 1 K-3 型データ収集システムの外観

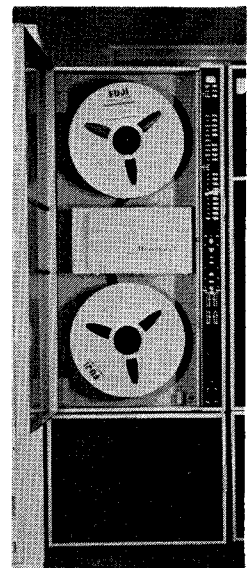


図 2 広帯域磁気記録装置

* 郵政省電波研・鹿島 Noriyuki Kawaguchi and Yuji Sugimoto: Kashima VLBI Station Equipped with the K-3 VLBI Data Acquisition System

** VLBI: Very Long Baseline Interferometry (長基線干渉計)

と正確に同期して作られる。19インチ幅1架の中にはこの外に、伝送ケーブルの遅延変化を監視する装置や受信系のシステム雑音温度を監視する装置なども含まれており、最新のマイクロプロセッサを各機器に組み込むことによって外部からの制御や各機器のステータスデータの収集が容易に行えるようになってきている。ホストコンピュータとのインタフェースは全て GP-IB に統一されているので、通常の計測器と同様のイメージで取扱うことができる。つまり計測用のパーソナルコンピュータで簡易な BASIC 言語を使って制御することができるので、個別機器の診断や観測用ソフトウェアの作製が容易に行える。

信号処理部から出力されたデータは、図2に示す広帯域磁気記録装置によってテープ上に記録される。テープの長手方向に1インチあたり約1メガビットものデータが記録されるが、VLBI 観測では雑音の 1/1000 にも満たない微弱な信号を検出するために大量のデータを必要とするので、このように高密度な記録を行ってもテープ1巻に30分弱のデータしか記録できない。このような理由から現在、更に高密度な磁気記録装置の研究開発が進められている。

VLBI では、厚い地球大気の下から電波星を眺めているので、電波のアンテナへの到達時刻が大気がない時と比べて遅れる。この遅れは主に大気中の窒素分子や酸素分子、水蒸気などと電波との相互作用で生じるが、中でも水蒸気は大気中に一様に分布していないうえに水蒸気量も日によって大きく変化するので取扱いが面倒である。この水蒸気による電波の遅延を測定するために水蒸気ラジオメータが開発された(図3)。水蒸気ラジオメータは大気中の水蒸気のふく射する熱雑音を高感度なラジオメータで受信し、その強度から電波の通路に沿った全水蒸気量を求め電波の遅れを算出するものである。この装置は VLBI によって電波の遅れ時間を精密に測定し、2局間の距離を3cm程度の誤差で決定するために欠かせないもので、更に精度を向上する努力が続けられている。

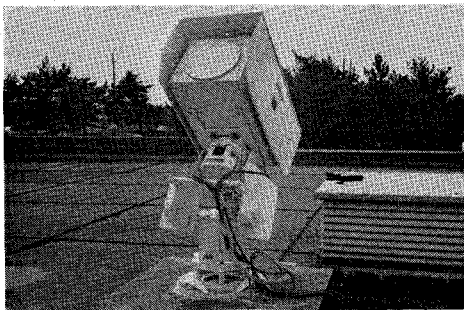


図3 大気の大気遅延を補正する水蒸気ラジオメータ

2-2 相関処理システム

各観測局で取得されたデータは、一ヶ所に集められ相関処理が行なわれる。図4は、鹿島局の相関処理装置の外観で、隣りにはデータを再生する広帯域磁気記録装置

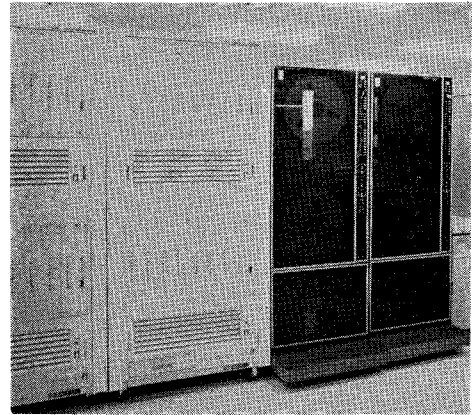


図4 再生相関処理システム

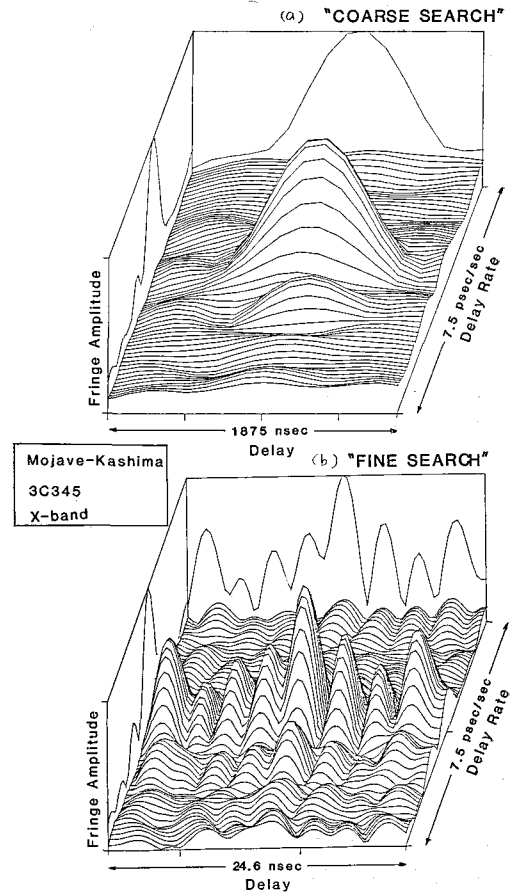


図5 相関処理結果と高精度な遅延時間の決定
(a) 粗合成 (b) バンド幅合成による精決定

が 2 台並べられている。データはこの 2 台を使って再生されるが、相関をとるためにほぼ同時刻のデータを相関装置に送り込んでやらなければならない。このため、テープの回転速度をほんのわずかに変え、再生されるデータの時系列が動かせるように工夫されている。このようにして時系列がそろえられたデータは相関処理装置によって相関がとられ、約 4 秒間積分される。相関データはディスク装置に格納され、ソフト的に更に長時間（通常 6 分間、弱い電波源の時には 12 分間）積分される。積分してゆくのと同時に、相関が最大になる遅延時間とその変化率が図 5 (a) に示すように探索される。次にこの山の最大付近を、各受信チャンネルの位相情報も使って合成すると図 (b) のように鋭い相関の山が得られる。こうして最終的に 0.1 ナノ秒より良い精度で遅延時間を決め、後の基線長の算出などに利用する。相関の結果、この遅延時間の外に、相関の大きさや相関の位相も得られるが、これらは電波源の微細構造や VLBI 観測に大きな影響を与える大気による位相の揺らぎ（位相シンチレーション）の大きさなどを調べるのにも利用される。また遅延時間やその変化率からは基線長の外に 2 局の基準時計の時刻差や電波源の天空上の位置、地球回転の極の位置や回転速度なども求めることができ、この相関処理結果は測地・位置天文、電波天文をはじめとして大気科学や国際間の時刻比較などに幅広く利用される。

2-3 標準時、標準周波数の管理システム

前節で述べた相関処理装置が相関をとることのできる時間幅（相関の窓）は $2 \mu\text{sec}$ なので、少なくともこの時間内に 2 局の時計が合わされていないと相関処理がスムーズに行えない。このため鹿島局の時系は日本標準時と大きくずれないように維持・管理されている。時刻はセシウム原子時計からの 1 秒パルスに正確に同期されており、この 1 秒パルスは 1 日に 4 回マイクロ回線で電波研究所の標準測定部に送られ、そこの 7 台のセシウム時計から作られている協定世界時に基づく日本標準時と常に比較されその変動が監視されている。標準測定部では GPS (Global Positioning System) 衛星からの信号やロラン C 電波も常時受信しており、国内外の時計との時刻差がいつでも高精度に求められるようになっていた外、米国とは少なくとも年 1 回、ポータブルクロックによって時計合わせを行なっている。

VLBI では時刻の維持だけでなく、安定な高精度の標準周波数の維持も重要である。それは単に受信周波数の絶対値を正しく合わせ、不要な相関位相の回転を抑える（もし周波数が 0.1 Hz ずれていると 10 秒間相関積分している間に位相は 360° 回転してしまい相関はまったくなくなってしまふ！）だけでなく、安定度が劣化すると受信する信号のコヒーレンスを低下させ相関値を小さく

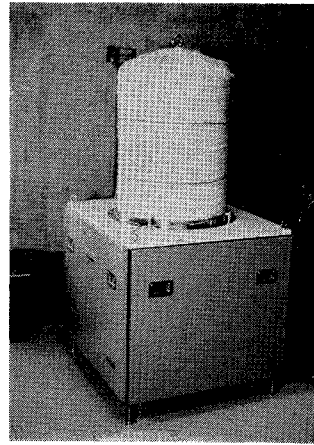


図 6 水素メーザ原子周波数標準器の量子系外観

してしまう。鹿島局には図 6 に示す超高安定な水素メーザ原子周波数標準器が 2 台あり、相互比較によって安定度とその変化が常時監視されている。また 2 台を有機的に結びつける自動同調法によって水素メーザの弱点である長期安定度の改善もはかられている。それらの絶対周波数は、時刻の基準でもあるセシウム原子時計の周波数基準信号と比較することで調節されている。2 台の水素メーザ原子周波数標準器を独立に使うと局内の相関実験を行ったところコヒーレンスファクタは 0.997 ± 0.003 となって、受信系の周波数変換などで信号のコヒーレンスがほとんど低下していないことが確認されている。

3. 26 m アンテナと鹿島 VLBI 局

国際的な VLBI 観測網の一翼を担うことになった鹿島 VLBI 局のアンテナ・受信設備の整備は、K-3 型 VLBI システムの開発と並行して進められ、昭和 58 年の 9 月に完成した。整備にあたっては、測地目的の VLBI 観測に必要な機能だけでなく、基礎的なデータの収集や将来の技術開発のための基礎実験、電波天文観測や高精度時刻比較実験にも対応できるように配慮がなされた。ここでは鹿島 VLBI 局の持っているさまざまな機能についての紹介を行う。

3-1 アンテナ・受信系

鹿島 26 m アンテナ (図 7) は昭和 43 年 10 月に建設され、以後衛星通信実験や電波天文観測に使用されてきたが、日米共同 VLBI 実験を契機に再調整がなされ、測地目的 VLBI 観測に必要な 2 GHz 帯と 8 GHz 帯の広帯域受信系が設置された。特に 8 GHz 帯では独立 2 系統の受信系を持ち、左右両円偏成分の同時受信が可能で、BL Lac 型電波源等の高分解能偏波観測が行える。またこの 2 系統の受信系の受信帯域を合成して現行のほぼ 2 倍の超広帯域バンド幅合成実験も行える。合成する周波

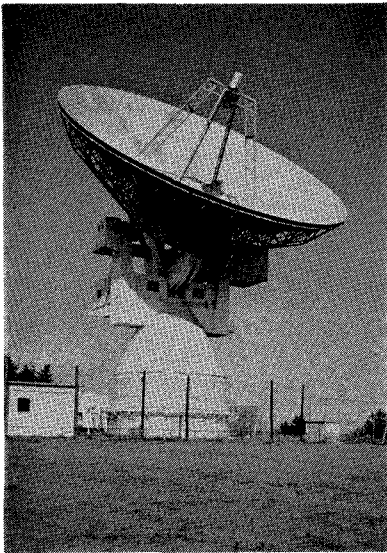


図7 26 m アンテナと遅延基準用標準受信装置

数帯域幅が広いと相手局アンテナの開口径が小さく十分な S/N で観測が行えない時でも高精度な遅延決定が行えるので将来の小型車載 VLBI 実験の時に有利である。2 台の受信系を独立に使うことで局内で実験を行い、局部発振源の周波数揺らぎによるコヒーレンスの低下が調べられたのは先に述べたとおりである。また周波数変換のための局部発振周波数を 1 Hz ステップでシフトすることができるので人工的に相関位相を回転させ実際の VLBI 観測に近い模擬実験も行える。

受信系のシステム雑音やアンテナ開口効率は高精度な測定で校正されており、図8に26 m アンテナ利得 (1 Jy の電波源を受信した時に得られる電波強度を雑音温度単位で表わしたもの) の仰角特性を示す。

3-2 ゼロ基線干渉計

図8に示すように仰角によってアンテナ利得が変化するのは主に主反射鏡が重量によってたわむことから生じるものと思われる。主反射鏡がたわむことでアンテナ系での電波の伝搬時間が変化することはないであろうか？

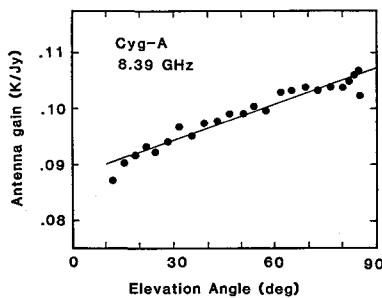


図8 26 m アンテナ利得の仰角特性

もし変化するとすれば電離層の伝搬遅延やケーブルの伝送時間の変化などにも補正する必要がある。また VLBI で国際間の時刻同期誤差を正確に測定するためには、このアンテナ系での電波の伝搬時間の絶対値も知る必要がある。そこで鹿島局にはゼロベースライン干渉計が組み込まれている。この干渉計は 26 m アンテナとその副反射鏡の背面に取付けられているもう1つの受信系から構成されている (図7参照)。副反射鏡背面の白い筐体の中にはホーンアンテナとともに VLBI に必要な受信機能のすべてが格納されており、共通の電波源をこの2つの受信系で受信し相関処理をすることで主反射鏡のたわみによる遅延時間の変化や、この補助受信系を「ものさし」にした主受信系の伝搬遅延を測定することができる。この補助受信系は電波ホログラフィーによる主アンテナの鏡面測定のための基準アンテナとしても使われる外に、大気の影響による拡散減衰量を見積もる時にも使われる。

4. むすび

鹿島 VLBI 局は現在国際的な VLBI 観測網の中の重要な固定基準局として年に 4~6 回の国際実験に参加している外、建設省国土地理院 (5 m アンテナ)、東京大学東京天文台野辺山宇宙電波観測所 (45 m アンテナ) など国内各機関と協力して実施されている測地目的・電波天文目的の VLBI 観測にも参加している。またこの局に備えられている種々の機能を利用して、VLBI 観測の精度を更に向上させるための基礎実験や将来の新しい VLBI システム、より小型で機動力の優れた高精度システムの開発のための基礎データの蓄積も進められている。ここから生み出されてくるさまざまなデータが、測地・電波天文・地球科学の広い分野で多に利用され次々と新しい知見が得られることを願っております。

新刊紹介

「地球観測ハンドブック」

友田好文, 鈴木弘道, 土屋 淳編
(東京大学出版会, 定価 15,000 円)

ハンドブックという名の通り、あらゆる地球に関する観測の原理、装置等について各々の専門家によって詳述されている。左右ページの端にキーワードが抜き書きしてあり便利である。地球物理学に限らず、観測・実験を行なっている者、あるいは、志す者にとっては辞書としての役立ちそうである。 (編集部: 安藤)