

解 説

3. KSP 計画における VLBI システム

3.1 KSP 計画での VLBI システムの概念

今江 理人* ¹	栗原 則幸* ²	高橋 幸雄* ²
近藤 哲朗* ²	高羽 浩* ²	岩田 隆浩* ²
木内 等* ³	小山 泰弘* ²	花土ゆう子* ¹
関戸 衛* ²	高橋富士信* ⁴	中島 潤一* ²
日置 幸介* ⁵	吉野 泰造* ³	浜 真一* ³

(1995年10月16日受理)

3. VLBI SYSTEM FOR KEY STONE PROJECT

3.1 THE DESIGN CONCEPT OF THE VLBI SYSTEM FOR THE KEY STONE PROJECT

By

Michito IMAE, Noriyuki KURIHARA, Yukio TAKAHASHI, Tetsuro KONDO, Hiroshi TAKABA, Takahiro IWATA, Hitoshi KIUCHI, Yasuhiro KOYAMA, Yuko HANADO, Mamoru SEKIDO, Kosuke HEKI, Taizoh YOSHINO, and Shinichi HAMA

The Communications Research Laboratory (CRL) has begun to construct a very unique precise measurement system for crustal deformation in the Tokyo Metropolitan Area in the study of earthquakes. This system is called the Key Stone Project (KSP) and it will have four sets of VLBI and SLR stations around the Tokyo Metropolitan Area.

Each VLBI station of the KSP project has an 11-m dish antenna and VLBI acquisition system. This system will be able to measure crustal deformation on the order of millimeters. All the remote VLBI stations will be automatically controlled from Koganei Central Station using a communication network. This VLBI network system is designed according to the concept of high precision as well as high reliability.

This VLBI system for the KSP project will be a compilation of the CRL's geodetic VLBI research.

[キーワード] VLBI, 地震調査研究, 宇宙測位技術.

VLBI, Earthquake research, Space geodesy.

1. ま え が き

平成5年度より開始された「首都圏広域地殻変動観測施設整備」(Key Stone Project; KSP と以下略す)の一

環として、当所では、首都圏4カ所(小金井, 鹿嶋, 三浦, 館山)に11m級のVLBI施設の整備を実施している。

本プロジェクトは、本特集号2章等で述べられているように、首都圏における直下型地震調査研究のための高精度、高時間密度での迅速な地殻変動観測が目的のシステムであり、VLBI(超長基線電波干渉計)とSLR(衛星レーザー測距)方式の2種類の異なる精密宇宙測位システムで構成される。

*1 標準計測部 周波数標準課
*2 関東支所 宇宙電波応用研究室
*3 標準計測部 時空技術研究室
*4 標準計測部
*5 国立天文台

当所は、VLBIの我が国におけるパイオニア的存在として、10数年前より研究開発を開始⁽¹⁾し、日米実験のための機器開発/実験の遂行を通じて、プレート運動の実証を行う等⁽²⁾、数々の成果を輩出し、機器開発から観測/データ処理、解析に至る総合的研究開発を行っている。

KSPプロジェクトでのVLBIシステムは当所としてのVLBI研究開発の測地目的面での1つの集大成ともいえるもので、現在の当所のVLBI技術の粋を尽くして整備を行っている世界的に見ても例を見ない先進的のものである。

2. KSPプロジェクトにおけるVLBIシステム開発思想

KSPプロジェクトにおけるVLBIシステムは、プロジェクトの性格上、信頼性の高い地殻変動データを高時間密度で提供するため、安定な観測の実施を行うことを基本に、かつ、高精度化のための挑戦的な開発要素を盛り込みつつ、以下に示す基本的概念に基づいてシステム設計を実施した。

《観測精度面》

- (1) 首都圏4局で連日4～5時間程度の観測でmmオーダーの地殻変動を検出する。
- (2) 目的を達成するために、現在の測地VLBIシステムとして、最高精度のものとする。

(短期間に陳腐化しない観測システムの構築)

- (3) 迅速なデータ処理・解析を行う。

相関処理・解析等のデータ処理は観測後1～1.5日以内に終了(所定時間の大部分は記録テープ輸送に係る時間)する。更には、実時間データ伝送による実時間データ処理を実現する。

《運用面》

- (4) 省力化・自動化に最大限努力する。
各観測局は原則として観測テープの集配を除き、中央局からの集中制御による完全無人運用を行う。
- (5) 観測システム・データ処理解析システムに高信頼性・高安定性を追求する。
- (6) システム全体を通じてマンーマシンインターフェースを充実させ、運用の容易なシステムとする。

特に、(3)に関しては、本特集号別掲に示したように、NTTとの共同研究の下開始した超高速デジタルネットワークを利用した観測データ伝送によるリアルタイムVLBIにより、ほぼ実時間で処理解析を実現しつつあり、テープ輸送による時間的遅れを解消できる見込みである。

3. 観測精度の目標

VLBIでの測地誤差要因と大きさは大陸間基線で、

- | | |
|---------------------|----------|
| (1) 熱雑音誤差(受信S/Nに起因) | 20～50 ps |
| (観測システム、電波星強度に依存) | |
| (2) 電離層補正誤差 | 10～20 ps |
| (3) 大気ランダム誤差 | ～50 ps |
| (4) モデル誤差 | ～50 ps |
| (5) その他(ハードウェアに起因) | 10～30 ps |
- に大別され、これらのRSS値で $\sigma = 70 \sim 90$ psが与えられる。

また、観測数(n)と水平方向、鉛直方向の決定精度は、おのおの $3\sigma/n^{1/2}$ 、 $7\sigma/n^{1/2}$ 程度で与えられることが従来の観測結果等から言うことができる。

一方、KSPプロジェクトでは、基線長が100 km程度と短いため、(2)～(4)の誤差要因は1/2程度に軽減されるところと考えると、10 mクラスのアンテナを用い、mm～1 cmの測地精度を1日4～5時間程度の観測で達成するためには、(1)の熱雑音に起因したものを、(5)のハードウェアに起因したものを、現在の技術水準で最小限に抑さえ、かつ、信頼性の高いシステムとして構築することを図っている。

4. KSP-VLBIシステムの構成

KSP-VLBIシステム全体は、第1図に示すような構成となっている。即ち

- (1) 11 m アンテナを中心とする4つの“VLBI観測局”
- (2) 4観測局を統合制御する“小金井中央局、並びに、鹿嶋副中央局”
- (3) 観測データの処理解析を行う“小金井相関局”
- (4) リアルタイムでの処理解析を可能にする“実時間VLBIシステム”
- (5) 中央局(副中央局)と各観測局を統合・制御するためのネットワークシステム

並びに、

- (6) 運用ソフトウェア

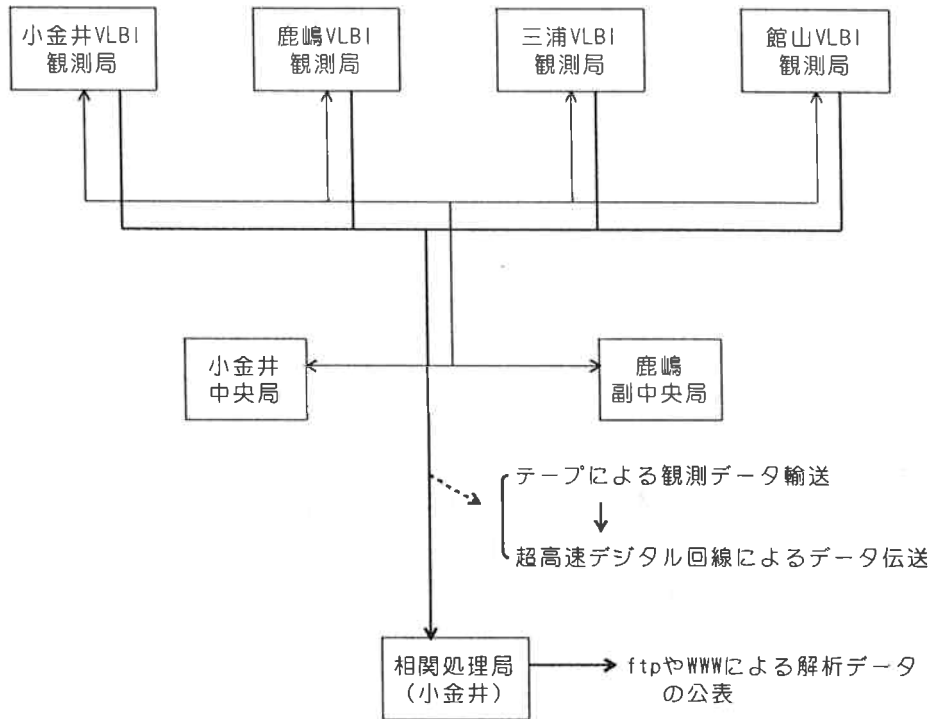
で構成され、各々は以下に概説するような機能を有している。

4.1 観測局システム

Sバンド(2 GHz帯)、Xバンド(8 GHz帯)の受信を行う11 mアンテナを中心としたVLBI観測局で、4局共全く同一の構成となっている。各観測局に設置される機器等の概要、並びに、特徴を以下に示す。

①アンテナ・受信系⁽³⁾

第2図にアンテナ外観を示すように、KSP用に新設計されたアンテナで機構的には、精密測地VLBIのため



第1図 KSP-VLBI システムの構成

に、

- (1) 測地基準点となる AZ・E1 軸の一致度・鉛直度を高精度のものにする
- (2) 観測電波源数を増大するため、電波星切り替えの際、高速スリューが可能
また、受信系は、
- (3) 受信周波数帯は、測地 VLBI で定評のある S バンド (2 GHz 帯)、X バンド (8 GHz 帯) を採用し、帯域幅は、両バンドとも従来の測地 VLBI に比較し 2 倍程度に広げ、後述の記録帯域幅の向上を含め等価観測帯域幅を拡大し、観測精度向上を図る
- (4) IF 信号信号の伝送に帯域特性の優れた光伝送方式を採用
等に考慮して設計を実施した。

②VLBI 観測機器⁽⁴⁾

VLBI 観測機器の基本的概念は、従来から定評のあるバンド幅合成法を用いることに基づき設計を実施した。また、1 チャンネルあたりの帯域幅を従来の 4 倍の 8 MHz とし、遅延時間決定精度の向上を図っている。

(1) ビデオ変換部

受信 IF 信号 (500- 1000 MHz) から複数チャンネルのビデオ帯信号に変換する部分で、1 チャンネルのビデオ帯帯

域幅を従来の 2 MHz から 32 MHz へと大幅に拡大し、新設計の入力インターフェース部との連携から帯域内の遅延特性の平坦化を図っている。

(2) 入力インターフェース部

ビデオ変換部からの 16 チャンネルのビデオ帯信号を高速サンプリングを行い、内部のデジタルフィルタでデジタル的に帯域制限を行うことにより、帯域制限の際の群遅延特性の帯域内変動を低減すると共に、機器の個体差に起因した観測局毎の特性のばらつきを排除している。

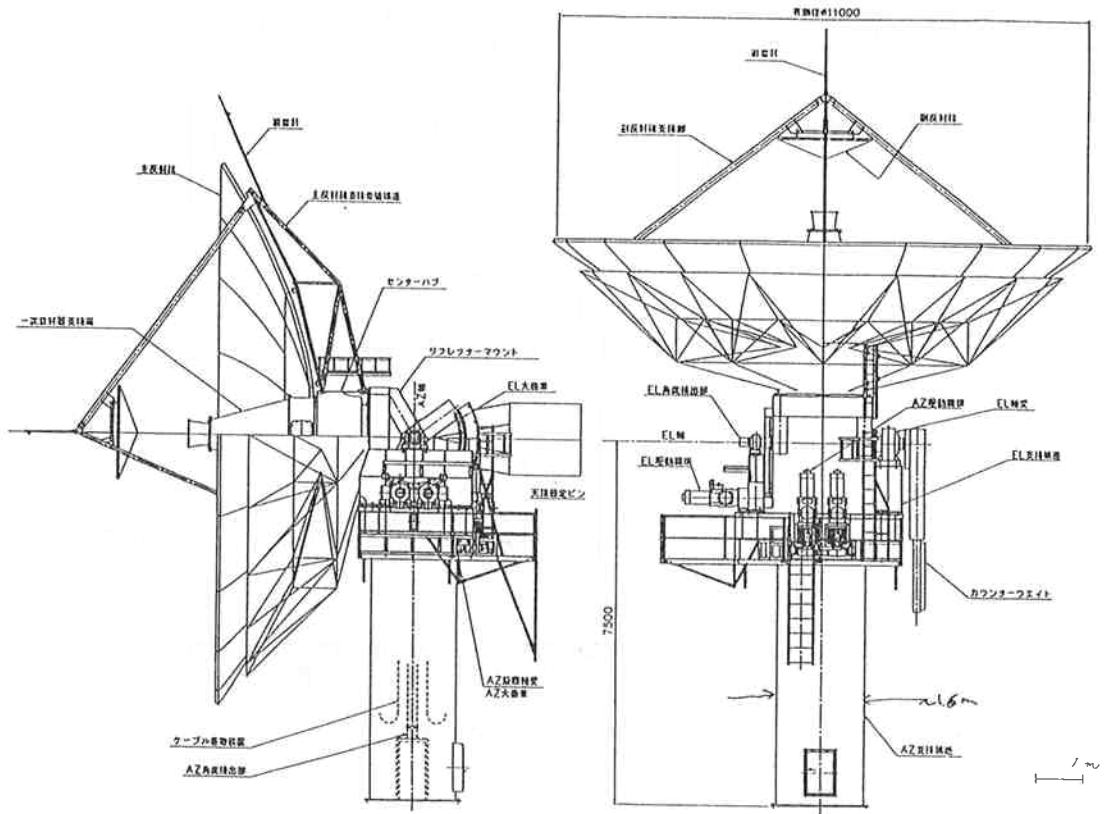
(3) デジタルデータ記録部

信号記録用には、K-4 型データレコーダー (DIR-1000) を使用し、かつ、同レコーダーの最大記録能力 (256 Mbps) をフルに活用している。

(4) カセットテープ交換部

観測の省力化・自動化のためにはテープ交換にデジタルマスストレージシステム (カセットテープオートチェンジャー) を採用し、従来 K-4 レコーダーを用いる際にも必要であったテープ交換作業を人手を介さずに行うことが可能になり、一連の観測作業の完全自動化を図っている。

③基準信号発生/システム遅延校正部⁽⁵⁾



第2図 VLBI観測用11mアンテナ外観図

(1) 基準信号発生部

基準信号としては、水素メーザー型原子周波数標準器を用い、高安定な基準信号を各機器へ供給している。

基準周波数は、従来の10 MHzから5 MHzに変更を行い、各観測装置で統一を図っている。従来のK-3システムでは必要基準周波数に5 MHzと10 MHzとが混在していることが、基準周波数供給上の課題の一つであったが、これをなくすことができている。

周波数安定度等は、従来器と同等であるが、自己診断機能等の充実により、安定供給の確認とともに、不具合発生時の発見を迅速に行えるよう配慮している。

また、時刻信号の基準としてはGPS受信装置からのGPS timeに同期した1 PPS信号を用い、各局が統一した時系を基準とすることにより、相関処理時の初期同期の省力化が可能になる。

(2) システム遅延校正部

遅延時間校正システムとしては新方式を採用し、バンド幅合成のための位相校正信号の安定化、ケーブル遅延変動測定部の高信頼性を図っている。

4.2 自動運用系及びソフトウェア⁽⁶⁻⁸⁾

観測用の自動運用系は、

- ・観測制御系（各観測局で稼働）
- ・自動監視系（各観測局で稼働）
- ・集中制御系（中央局・副中央局で稼働）

に大別される。

(1) 観測制御系

観測制御ソフトウェアは、無人運用を前提としている本プロジェクト用では、従来のオペレータが常に存在していることを前提としていたものに比べ、信頼性が高く、かつ、専門家でなくとも操作が容易なものとする。

(2) 自動監視系

自動監視ソフトウェアは、やはり、各局が基本的に無人であることを前提とし、各観測機器が正常に動作していることをモニターし、中央局からの集中制御計算機に常時ステータス情報を通知する。

(3) 集中制御系

集中制御ソフトウェアは、小金井中央局と鹿島副中央局に設置され、各局の運用状態のモニターを行い、不具

合局が発生した場合、直ちにアラームを発生し通知する。また、観測のスケジュール管理を集中して行う。

4.3 ネットワーク系⁽⁸⁾

KSP各観測局と中央局・副中央局の間には2系統の通信ネットワークを構築すること想定しており、一系統に不具合が発生した場合でもバックアップネットワーク系で安定して観測の指示・ステータス管理が行えるよう配慮している。

4.4 相関処理／解析装置及びソフトウェア⁽⁸⁻¹²⁾

相関処理装置としては、KSPプロジェクト専用の相関処理装置を開発している。観測は各局で256 Mbpsで記録を実施するが、相関処理装置の処理速度は、将来の拡張性を考慮し、512 Mbpsまでの処理が可能なものの整備を行っている。

また、相関処理部はKSP-VLBI局4局6基線が同時に処理可能な様に6基線分が用意されており、かつ、相関処理装置用にもマストレージシステムを用い、テープ装着後は基線解析までの処理／解析がほぼ完全自動にできる様に配慮している。

4.5 実時間 VLBI システム⁽¹³⁻¹⁵⁾

実時間 VLBI に関しては、観測局システムは基本的にはレコーダーベースのシステムと同一のものを使用し、入力インターフェース部以降を超高速度デジタルネットワークに結合し、小金井相関局へ実時間でデータを伝送することにより、直接相関処理装置へ観測データを直接入力／処理を行う。

5. 運用形態

4局整備終了時における観測運用形態としては、前述の様に、定常状態では、4～5時間／日の観測を実施することを想定している。観測の開始は集中制御を行う中央局から通信回線により各観測局に自動的に指示がなされ、観測スケジュールが周知される。各局はこれに従い、観測を自動的に行う。

データ量は、当面定常状態において4～5時間／日の観測でD1タイプデジタルカセットテープ3巻に記録される。輸送形態としては当面、宅配便を想定しており、観測終了後、直ちに相関処理局へ配送され、処理解析が行われる。

レコーダーベースのVLBI運用の時点では、テープ配送到に係る時間的制約により、最終的解析結果の出力までには、観測終了後1～1.5日を要するが、実時間VLBIシステムが完成すれば、観測後、2～3時間毎に基線解析結果を出力することが可能となる予定であり、また、観測も24時間連続での無人運用も可能となる。

6. まとめ

今回のKSPプロジェクトにおけるVLBI観測施設は、測地面での当所VLBIの集大成であるといえる。本来目的である信頼性の高い「地震調査研究のための地殻変動データ」の関係機関への安定かつ迅速な供給はもとより、それだけにとどまらない観測・研究開発面、特に、超高速度デジタル通信網を活用した超最先端のVLBI技術革新に向けた成果を出しうるシステムとしての構築を図っていきたい。

謝辞

KSP計画全体の推進に関しご指導を頂いた小島前当所次長、横山現次長の両氏に感謝いたします。また、施設整備にご尽力を頂いた企画部、総務部、関東支所管理課の方々にお礼を申し上げます。

参考文献

- (1) 電波研究所季報, "K-3型超長基線電波干渉計(VLBI)システム開発特集号, vol. 30, special issue, Nov., 1984.
- (2) Journal of the Communications Research Laboratory, vol. 38, No. 3, Special Issue, Nov. 1991.
- (3) 栗原, 他, "3.2.1 アンテナ・受信系", 通信総研季, 42, 1, pp. 21-28, Mar. 1996.
- (4) 木内, 他, "3.2.2 データ取得系", 通信総研季, 42, 1, pp. 29-35, Mar. 1996.
- (5) 花土, 他, "3.2.3 基準信号発生/システム遅延校正部", 通信総研季, 42, 1, pp. 37-44, Mar. 1996.
- (6) 高羽, 他, "3.2.4 観測制御システム", 通信総研季, 42, 1, pp. 45-54, Mar. 1996.
- (7) 岩田, 他, "3.2.5 自動監視システム", 通信総研季, 42, 1, pp. 55-61, Mar. 1996.
- (8) 小山, 他, "3.2.6 集中制御システム", 通信総研季, 42, 1, pp. 63-71, Mar. 1996.
- (9) 木内, 他, "3.4.1 相関処理装置", 通信総研季, 42, 1, pp. 91-98, Mar. 1996.
- (10) 関戸, 他, "3.4.2 一次処理ソフトウェア", 通信総研季, 42, 1, pp. 99-107, Mar. 1996.
- (11) 近藤, 他, "3.4.3 バンド幅合成ソフトウェア", 通信総研季, 42, 1, pp. 109-119, Mar. 1996.
- (12) 小山, 他, "3.4.4 データ解析ソフトウェア", 通信総研季, 42, 1, pp. 121-130, Mar. 1996.
- (13) 今江, 他, "3.3.1 KSPでの実時間VLBIシステム概要", 通信総研季, 42, 1, pp. 73-77, Mar. 1996.
- (14) 渡邊, 他, "3.3.2 ATM網におけるリアルタイム

VLBI 通信装置構成”, 通信総研季, 42. 1, pp. 79-84, Mar. 1996.

(15) 浜, 他, “3.3.3 実時間データ処理システム”, 通信総研季, 42. 1, pp. 85-89, Mar. 1996.

