

---

 研 究
 

---

## 3.2 VLBI 観測システム

### 3.2.1 アンテナ・受信系

栗原 則幸\*<sup>1</sup> 高羽 浩\*<sup>1</sup> 中島 潤一\*<sup>1</sup>  
 今江 理人\*<sup>2</sup> 吉野 泰造\*<sup>3</sup>

(1995年10月16日受理)

#### 3.2 OBSERVATION SYSTEM FOR KSP—VLBI

##### 3.2.1 ANTENNA AND RECEIVER SYSTEM OF THE KEY STONE PROJECT

By

Noriyuki KURIHARA, Hiroshi TAKABA, Jyunichi NAKAJIMA,  
 Michito IMAE, and Taizoh YOSHINO

The Communications Research Laboratory (CRL) has been developing the Crustal Deformation Monitoring system for the Tokyo Metropolitan Area since FY 1993. This project is called the "Key Stone Project (KSP)". The antenna and receiver system is used in the KSP VLBI data acquisition terminal. The antenna and receivers must have high sensitivity for continuous data production that is both high quality and reliable. This antenna is an alt-azimuth-drive and has a 11-m modified surface parabolic dish. It is equipped with a Frequency Selective Sub Reflector (FSSR) in order to give it high aperture efficiency in both the S and X bands. We designed the antenna's reference position (geodetic VLBI reference point) to be fixed within 3 mm during a year. So the base of the antenna pedestal is firmly connected to the hard ground by long pilings. The receivers are equipped with FET-type low-noise pre-amplifiers and an optical-fiber IF signal transmission system for the S and X bands. This paper describes the performance and the details of this antenna and receiver system.

[キーワード] 宇宙測地, 地殻変動, VILBI, SLR, アンテナ, 受信器.

Space geodesy, Crustal deformation, VLBI, SLR, Antenna, Receiver.

#### 1. はじめに

通信総合研究所は、1993年度より首都圏広域地殻変動観測計画(通称【要石(かなめいし)計画] KSP: Key Stone Project)を開始した。KSP<sup>(1)</sup>は、首都圏4か所(小金井市, 鹿嶋市, 三浦市, 館山市)に専用のVLBI(超長基線電波干渉計)及びSLR(衛星レーザー測距システム)観測局を新設し、宇宙技術を用いた地殻変動の定常観測を目的としている。KSPの観測局整備は、VLBIシ

ステム<sup>(2)</sup>整備を先行的に実施し、小金井中央局, 鹿嶋副中央局, そして三浦観測局と3か所のVLBI観測局が完成し、試験運用を開始した。現在は、第4番目の館山観測局整備及びSLRシステムの全局配備を展開している。

本稿で述べるアンテナ・受信系は、高精度測地VLBIを実現するための重要な観測ハードウェアの1つである。即ち、アンテナ開口能率、アンテナ・受信系等に起因する内部発生雑音(システム雑音)、アンテナ駆動等の性能がVLBI測定精度を決めるパラメータとなる。見方を変えれば、これらアンテナ・受信系の性能が、地殻変動検出感度に大きく影響するとも言える。本論文では、

\*<sup>1</sup> 関東支所 宇宙電波応用研究室

\*<sup>2</sup> 標準計測部 周波数標準課

\*<sup>3</sup> 標準計測部 時空技術研究室

第1表 VLBI観測システムに対する設計概念

<ul style="list-style-type: none"> <li>・首都圏における地殻変動検出が可能となる高い観測システム感度を有すること。</li> <li>・信頼性の高い観測データを定常的に生産できること。</li> <li>・システムが簡便で、非熟練者による観測・管理・運用が可能であること。</li> <li>・維持/管理/保守が容易で、24時間以上の観測データ欠測期間(時間)を生じさせないこと。</li> </ul>
--

完成した3観測局の実測データを含め、KSP用として新たに開発したVLBI観測用アンテナ・受信系の機能、性能、そして特徴等について述べる。

## 2. VLBI観測用アンテナ・受信系の設計概念

本アンテナ・受信系は、高精度な測地VLBI実験を首都圏で行い、地殻変動モニターを行うためのVLBI観測システムの一部として使用する。KSPが想定したVLBI観測は、毎日5時間以上定常的に行うことが必須であり、且つ、小金井中央局に整備した遠隔集中制御システムからの無人自動運用に耐える信頼性の高いシステムでなければならない。そこで、弱い電波源まで観測できる高いアンテナ開口能率、低雑音受信器の開発、広範な方位角及び仰角での観測、アンテナ駆動最適制御、広帯域光伝送方式によるIF信号伝送、そしてアンテナ基礎部及び測位基準点の変動対策等、高感度と高信頼性をアンテナ・受信系全体の設計概念として掲げた。

運用面においても、連日稼動となるアンテナ機構系の

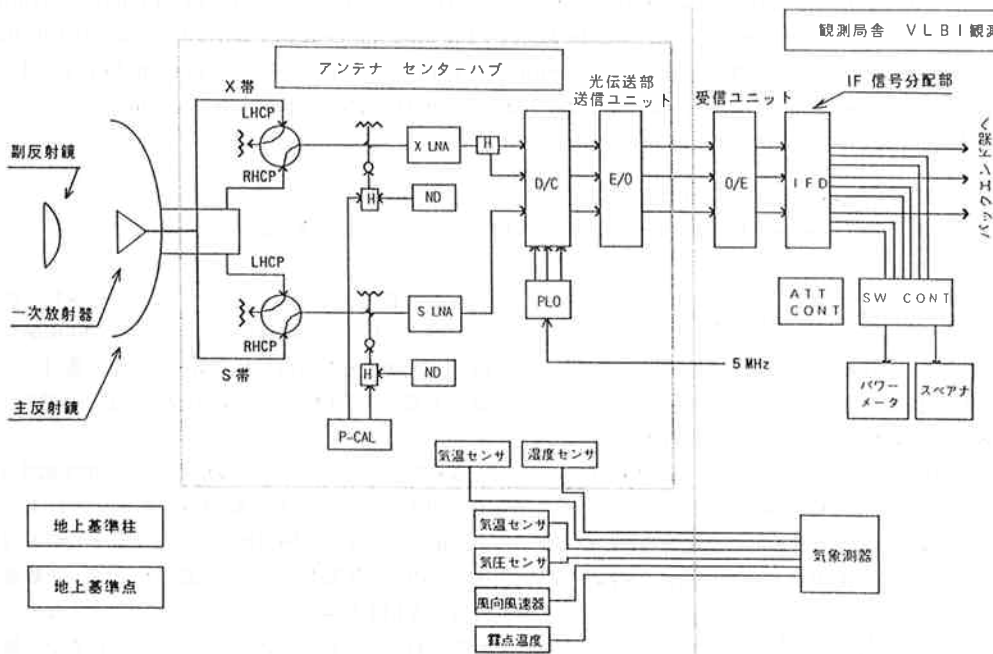
トラブル防止、トラブル発生時のアラーム表示、通信ネットワークを利用した小金井中央局への報知機能の充実、観測システム維持管理の簡略化等、定常運用の効率化を重視した。アンテナ・受信系のみならず、こうしたVLBI観測システム全体に対する設計概念を第1表に示す。

## 3. VLBI観測用アンテナ

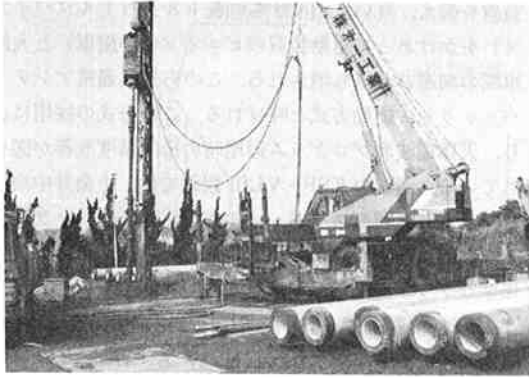
VLBI観測用アンテナは、アンテナ基礎部、アンテナ機構系、アンテナ駆動部、気象観測器、そして付帯設備等から構成される。以下に、各ブロック毎に、その機能及び特徴等について述べる。VLBI観測用アンテナ・受信系のブロック図を第1図に示す。

### 3.1 アンテナ基礎部

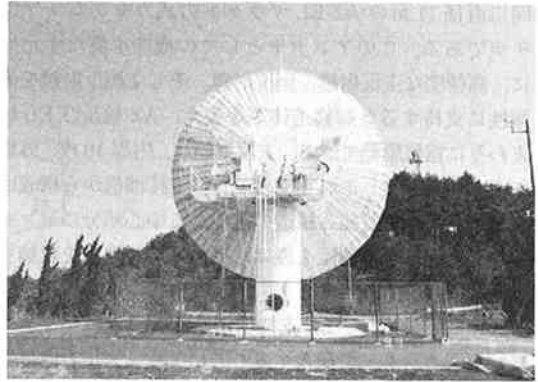
首都圏に整備する各観測局の地層構成は、それぞれ異なる。そこで、VLBI観測用アンテナ建設予定地での地質調査を実施した。調査は、ロータリー式ハンドフィード型試錘機と呼ばれる掘進装置で、地盤強度の指標とな



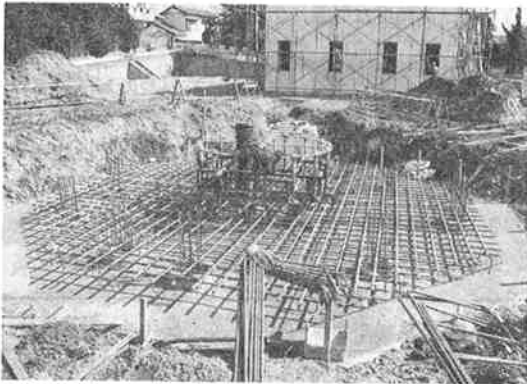
第1図 VLBI観測用アンテナ・受信系のブロック図



第2図 VLBI観測用アンテナの基礎杭（コンクリート製パイル）打設作業状況



第4図 KSP・VLBI観測用アンテナ（鹿嶋局）



第3図 基礎杭頭部とアンテナ基礎とを結合する鉄筋組み状況



第5図 周辺樹木によるブロッキングを防止するためにマウントタワーを高上げた小金井局のKSP・VLBI観測用アンテナ

るN値（標準ハンマーで30 cm 打ち込みに要する打撃回数）測定と、N値測定時に採取したサンプル試料を分析した。この地質調査結果を基に、支持層（N値50を越える基盤）に到達する基礎杭（コンクリート製パイル）を打設し、基礎杭頭部をアンテナ基礎に結合させた。基礎杭の長さは、小金井局11 m、鹿嶋局32 m、そして三浦局が15 mである。現在建設工事中の館山局は、11 mの基礎杭を打設する。VLBI観測用アンテナ基礎杭の打設作業状況を第2図に、基礎杭頭部とアンテナ基礎とを結合する鉄筋組み状況を第3図に写真で示す。

### 3.2 アンテナ機構系

アンテナ機構系は、アンテナ装置、そして放射給電部から構成される。

#### 3.2.1 アンテナ装置

本装置は、天体電波源からのS帯（2 GHz）及びX帯（8 GHz）の微弱雑音信号を高能率、低雑音にて受信する



第6図 三浦局の観測局舎とVLBI観測用アンテナ

開口直径 11 m の AZ-EL マウント方式カセグレンアンテナである。このアンテナとしての機能を満たすために、高精度な主反射鏡、副反射鏡、そして副反射鏡を高精度に支持する 3 脚構造体等を備え、AZ 軸及び EL 軸まわりに電気駆動できる。主反射鏡は、内周 10 枚、外周 20 枚のパネルと、それを支える背面支持機構から構成される。主反射鏡骨組み構造の核となる中心部分にセンターハブと呼ばれる部屋を設け、受信系関連機器を収納する。

天頂固定装置は、EL 支持構造から主反射鏡マウントにピンをモーターで挿入することにより、天頂方向位置で保持固定できる。この装置により、アンテナ主反射鏡は瞬間最大 60 m/s の風にも耐える（設計上）。鹿嶋局のアンテナ後方からの外観写真を第 4 図に、周辺樹木によるブロッキングを防止するためにマウントタワーを嵩上げた小金井局アンテナ外観写真を第 5 図に、そして三浦局の観測局舎とアンテナ外観写真を第 6 図に示す。

### 3.2.2 放射給電部

放射給電部は、副反射鏡、1 次放射器、2/8 GHz 帯分波器、8 GHz 帯円偏波発生器、そして 8 GHz 帯偏分波器から構成される。放射給電部の基本機能は、反射鏡から到来する電磁波のうち、8 GHz 帯円偏波信号及び 2 GHz 帯円偏波を、それぞれの周波数帯に分離した後、直線偏波に変換し、以降に続く各入力立体回路に導く。使用するそれぞれの構成部品は、広帯域高能率で動作するように設計し、放射給電部全体として広帯域低損失化が図られている。KSP で採用した放射給電部の主要性能を第 2 表に、そして主な特徴を第 3 表に示す。さらに、放射給電部の系統図を第 7 図に示す。

### 3.3 アンテナ駆動部

本アンテナの AZ-EL 駆動機構は、各々 2 系列の駆動

装置を備え、互いに相反する回転トルク（トルクバイアス）をかけあって駆動装置のピニオン（小歯車）と大歯車間の歯遊びが打ち消される。この方式は通常アンチ・バックラッシュ駆動方式と呼ばれる。この方式の採用により、天体電波源プログラム追尾時の指向精度改善が図られている。通常の KSP・VLBI 観測では、小金井中央局で作成された観測スケジュールが通信ネットワーク経由で、事前に観測局内の観測制御計算機に送られ、自動的にプログラム追尾が起動される<sup>(3)</sup>。

AZ-EL 駆動機は、屋外設置仕様で密閉型の 3.7 kw 直流電動機である。角度検出器は、アブソリュート・ロータリー・エンコーダを用い、角度分解能 0.005° を達成している。

### 3.4 気象観測器

測地 VLBI 実験では大気による遅延時間の補正を行うため、高精度な気温、気圧、そして湿度測定データが必要である。さらに、強風時のアンテナ運用を制限する風速情報も必要となる。そこで、これら必要な気象観測データを取得する気象観測器を整備し、1 分毎のデータをモニター蓄積している。気象観測器の主要性能を第 4 表に示す。

### 3.5 付属設備

第 4 表 VLBI 観測用・気象観測器の主要性能

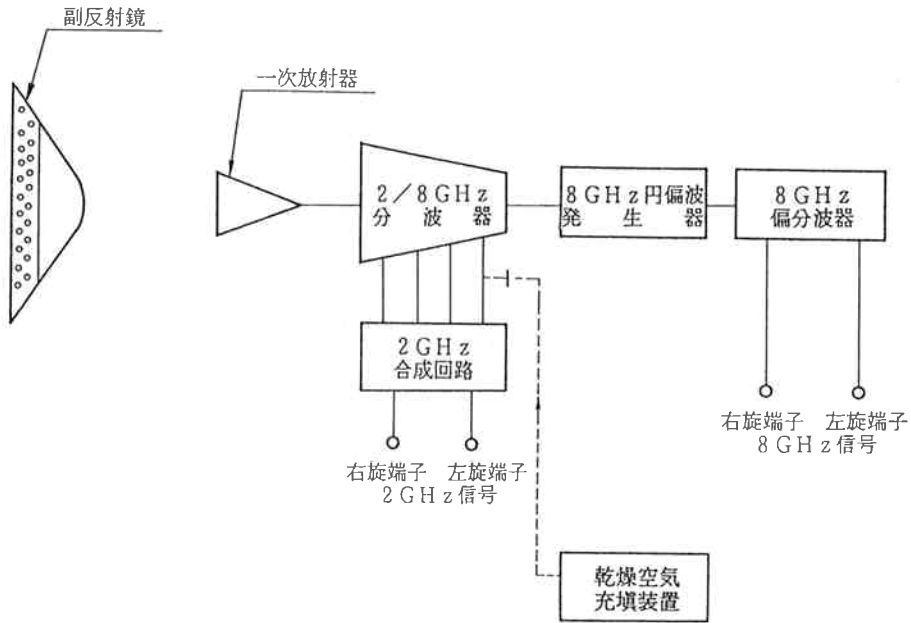
項目	測定範囲	測定精度
・気温	-30 °C ~ 40 °C	± 0.2 °C
・気圧	800 hPa ~ 1050 hPa	± 0.2 hPa
・湿度	0 ~ 100 %	± 3 %
・風向	0 ~ 360 °	± 5 °
・風速	10 m/s 以下 10 m/s 以上	0.5 m/s 5 %

第 2 表 VLBI 観測用アンテナ・放射給電部の主要性能

項目	S バンド	X バンド
・周波数帯域幅	2100 ~ 2500 MHz	7700 ~ 8600 MHz
・V SWR	1.3 以下	1.3 以下
・偏波	右旋/左旋円偏波	右旋/左旋円偏波
・軸比	2.0 dB 以下	2.0 dB 以下

第 3 表 VLBI 観測用アンテナ・放射給電部の主な特徴

- ・ 2 GHz 帯及び 8 GHz 帯信号の同時受信が可能。
- ・ 2 GHz 帯及び 8 GHz 帯とも、直交円偏波（右旋/左旋円偏波）信号受信が可能。
- ・ 2 周波数帯共用コルゲートホーンの採用により、2/8 GHz 帯の両周波数帯とも軸対称パターンが得られる。
- ・ 周波数選択板（FSRS: Frequency Selective Reflecting Surface）を副反射鏡外周部に装着し、2 GHz 帯における副反射鏡からのスピルオーバーが軽減でき、アンテナ開口効率の向上と広角度指向性が改善できる。



第7図 VLBI観測用アンテナ放射給電部の系統図

主反射鏡背面のセンターハブ内には、低雑音増幅器、周波数変換部、光伝送部、そして位相（遅延）校正器等、環境温度に敏感な観測用機器が収納される。そのため、年間を通じ、センターハブ内温度環境を一定に保持する空調装置を備えている。現状では、設定温度を25℃とし、±3℃以内で自動制御している。

アンテナ周辺の地上に、高さ約1.5mの地上基準柱と、国土地理院が定める四等三角点相当の標石を埋設した地上基準点とを設けた。これらは、GPS及びSLR観測との比較実験を行う際に使用する。第8図に鹿嶋局の地上基準柱の上部にGPS受信器を取り付けた際の外観写真を示す。さらに、アンテナマウントタワー及び主反射鏡背面支持機構部に、コーナーキューブ・リフレクタ取付け治具も用意し、将来のSLRコローケーション実験に備えた。

安全対策面では、11mアンテナ駆動状態をモニターするITVカメラを設置した。このモニター画像は、通信ネットワーク経由で、小金井中央局にリアルタイム伝送され、アンテナ駆動状態や部外者の立ち入りが常時監視できる<sup>(4)</sup>。

これまで述べてきた、VLBI観測用アンテナに関する主要な機能及び性能をまとめて第5表に示す。

#### 4. VLBI観測用受信系

VLBI観測用の受信系は、低雑音増幅器、周波数変換



第8図 GPS受信器を上部に取り付けた地上基準柱（鹿嶋局）

部、光伝送部、そしてIF信号分配部等から構成される。以下に、各ブロック毎に、その機能及び特徴等について述べる。

##### 4.1 低雑音増幅器

低雑音増幅器は、S帯、X帯とも主反射鏡背面のセンターハブ内に収納されている。KSPで使用する低雑音増幅器の選択にあたっては、2. 設計概念の項でも述べたように、最高性能や新規性を追求するよりも低雑音で信頼性が高いことを重視した。このため、低雑音増幅器は、長年の実績を有し、ほぼメンテナンスフリーに近い非冷却方式の常温タイプ低雑音増幅器を選択した。

第5表 VLBI 観測用アンテナに関する主要な機能及び性能

<ul style="list-style-type: none"> <li>主反射鏡直径</li> <li>マウント方式</li> <li>受信周波数帯 (受信系共通)</li> </ul>	11 m AZ-E Lマウント方式 S帯: 2100 - 2500 MHz、X帯: 7700 - 8600 MHz		
<ul style="list-style-type: none"> <li>駆動方式</li> <li>駆動回転速度</li> <li>駆動範囲</li> </ul>	アンチバックラッシュギア駆動方式 (デュアルドライブ方式) 最大 3° / sec 電気駆動 PRE LIMIT: AZ系: ± 270°、EL系: 2° ~ 90° 電気駆動 FINAL LIMIT: AZ系: ± 273°、EL系: 1° ~ 91° 計算機制御 LIMIT: AZ系: ± 265°、EL系: 5° ~ 88°		
<ul style="list-style-type: none"> <li>角度検出器</li> </ul>	角度検出素子 : アブソリュート・ロータリー・エンコーダ 角度分解能 : 0.005° (19ビット)		
<ul style="list-style-type: none"> <li>アンテナ基礎パイル長 (m)</li> <li>アンテナ直交点位置 (m)</li> <li>主反射鏡鏡面精度<sup>*1</sup> (mm)</li> <li>AZ軸の鉛直度 (秒)</li> <li>駆動軸の直交度 (秒)</li> </ul>	小金井局: 11 約 11.5 0.08 rms. 17(Az194) 5	鹿嶋局: 32 約 7.5 0.10 rms. 12 <sup>*2</sup> (Az330) 6 <sup>*2</sup>	三浦局: 15 約 7.5 0.09 rms. 13 <sup>*3</sup> (Az350) 三浦局: データ無し
<ul style="list-style-type: none"> <li>運用風速</li> <li>耐風速</li> </ul>	25 m/s (瞬間最大) 60 m/s (瞬間最大)		
<sup>*1</sup> 現地組立時の実測値。 <sup>*2</sup> 鹿嶋局: 鉛直度・直交度調整工事及び断熱対策工事前の鉛直度: 122秒、直交度: 81秒。 <sup>*3</sup> 三浦局: 鉛直度・直交度調整工事及び断熱対策工事前の鉛直度: 62秒。			

第6表 VLBI 観測用・S帯及びX帯低雑音増幅器の主要性能

項目	Sバンド	Xバンド
・受信周波数範囲	2100~2500 MHz	7700~8600 MHz
・利得	50 dB 以上	50 dB 以上
・利得偏差	2 dB p-p以下	2 dB p-p以下
・雑音温度	50 K 以下	80 K 以下
・利得安定度	4 dB p-p 以下	4 dB p-p 以下
・入力 VSWR	1.5 以下	1.5 以下
・出力 VSWR	1.5 以下	1.5 以下

S帯及びX帯の低雑音増幅器は、FET 4段 (X帯は6段) よりなる GaAs FET 低雑音増幅器で、2 GHz/8 GHz でそれぞれ 50 dB 以上の利得を持つ。さらに、アルミニウム製完全気密ケース内に実装することにより、高度の安定度を維持できる。鹿嶋局、小金井局、そして三浦局に配備した低雑音増幅器の雑音温度実測値は、第6表に示すようにS帯 50 K以下、X帯 80 K以下の性能を確認した。第6表にS帯及びX帯低雑音増幅器の主要性能を示す。

#### 4.2 周波数変換部

低雑音受信器からのS帯及びX帯信号は、周波数変換部に入力される。そして、不要波を除去する6段チェビシェフ型バンドパスフィルターを通過した後、S帯1系

統、X帯2系統 (X<sub>L</sub>, X<sub>H</sub>) の広帯域 IF 信号に周波数変換される。X帯の2系統化は、VLBI による観測精度向上を図るために、より広帯域化することが求められたためである。周波数変換のためのローカル信号は、観測局舎から同軸ケーブルで伝送された水素メーザ基準信号 (5 MHz) に同期した PLO (Phase Locked Oscillator) から作られる。周波数変換用のローカル周波数は、S帯が 3000 MHz、XL 及び XH 帯がそれぞれ 7200 MHz 及び 7600 MHz である。VLBI 観測用周波数変換部の主要性能を第7表に示す。

#### 4.3 光伝送部

光伝送装置は、周波数変換されたS帯 (500 ~ 900 MHz) 及びX帯 (500 ~ 1000 MHz) の IF 信号を観測局

第7表 VLBI 観測用・周波数変換部の主要性能

項目	規 格		
	S 帯	X <sub>L</sub> 帯	X <sub>H</sub> 帯
・入力周波数 (MHz)	2100 ~ 2500	7700 ~ 8200	8100 ~ 8600
・出力周波数 (MHz)	500 ~ 900	500 ~ 1000	500 ~ 1000
・ローカル周波数 (MHz)	3000	7200	7600
・雑音指数 (dB)	15 以下	15 以下	15 以下
・変換利得 (dB)	50 以上	50 以上	50 以上
・利得偏差 (dB)	± 1 以内	± 1 以内	± 1 以内
・イメージ信号除去比 (dB)	50 以上	50 以上	50 以上
・最大出力レベル (dBm)	+ 10 以上	+ 10 以上	+ 10 以上
・局発基準信号周波数、入力レベル	5 MHz、+10dBm ± 2 dB		
・局発出力信号レベル	+ 10 dBm		
・局発スプリアス	高調波：-20 dBc 以下、その他：-50 dBc 以下		

第8表 VLBI 観測用・光伝送部の主要規格及び性能

・送受信系統数	3 系統 (S、X <sub>L</sub> 、X <sub>H</sub> )
・光ファイバケーブル	シングルモード
・ケーブルコネクタ規格	FC/PCコネクタ
・送信部	
入力周波数	0.5 ~ 1.0 GHz
入力インピーダンス	50 Ω (V SWR ≤ 1.5)
入力レベル	+ 10 dBm 以下 (トータル)
入力接栓	SMA
・受信部	
出力周波数	0.5 ~ 1.0 GHz
帯域内偏差	2 dB p-p 以下 (送信部と併せて)
出力インピーダンス	50 Ω (V SWR ≤ 1.5)
出力レベル	- 10 dBm 以下 (トータル)
出力接栓	SMA
リンクゲイン	-20 dB ± 1 dB 以内

舎のバックエンド架に光伝送する装置である。装置の構成は、アンテナセンターハブ内に収納される光伝送用送信ユニット (E/O) と観測局舎内に設置した光伝送用受信ユニット (O/E) とから構成され、その間を光ファイバーで接続する。VLBI システムでは、IF 信号伝送ケーブル内での遅延変動補正を行なう遅延校正ケーブルカウンタが別途用意されているが、そうした遅延変動や伝送帯域内周波数特性劣化を最少限に抑えられていることが望ましい。そこで、ケーブルイコライザ等を必要としない波長 1.3 μm のシングルモードを用いた広帯域光伝送方式を採用した。光伝送部はセンターハブ内に設置されることから、アンテナ駆動や空調機稼動で生じる僅かな振動を受けてしまう。こうした振動対策も重要である。VLBI 観測用・光伝送部の主要規格性能を第 8 表に示す。

#### 4.4 IF 信号分配部

光伝送用受信ユニット (O/E) から出力される各 IF 信号 (S, X<sub>L</sub>, X<sub>H</sub>) は、本装置のアイソレーションアンブ経由で 3 系統に分配増幅される。通常の信号分配先は、・VLBI バックエンド架、・混信調査用スペクトラムアナライザ、・システム雑音温度測定用パワーメータである。さらに、VLBI バックエンド架へ出力する信号ルートに、レベル調整用プログラマブル減衰器が装備され、観測制御計算機からの最適レベル制御が可能である。

## 5. ま と め

KSP 専用の VLBI 観測用アンテナ・受信系を開発整備した。VLBI 技術による定常的な地殻変動モニターという目的の性格上、開発にあたっては高感度と高信頼性

第9表 VLBI観測用アンテナの開口能率及びシステム雑音温度の実測値

		小金井局	鹿嶋局	三浦局
・アンテナ開口能率	S帯(2.30 GHz、右旋円偏波)*	81 %	80 %	78 %
	X帯(8.15 GHz、右旋円偏波)	67 %	71 %	70 %
		(24 Aug. 1994)	(5 Aug. 1994)	(14 May. 1995)
・システム雑音温度	S帯(2.30 GHz、EL=30° 晴天)	76 K	71 K	70 K
	X帯(8.15 GHz、EL=30° 晴天)	95 K	99 K	112 K
		(24 Aug. 1994)	(5 Aug. 1994)	(14 May. 1995)
* 現地測定報告データによると、S帯の開口能率が各観測局とも一様に高い。CRL側で別途測定する。				

を重視した。現時点で、小金井局、鹿嶋局、そして三浦局のVLBI観測用アンテナ・受信系が完成した。各観測局での現地調整データも含め、多岐に渡る開発関連データを得た。現地調整員が完成時に測定したアンテナ開口能率、システム雑音温度の実測値を第9表に示す。

1995年1月末から鹿嶋-小金井基線でのVLBI連日試験観測<sup>(5)</sup>、1995年12月1日から鹿嶋-小金井-三浦基線での定常観測運用がスタートし、VLBI観測局の無人運用も始まった。今回開発したアンテナ・受信系は、こうしたVLBI観測運用に対し、大きなトラブルもなく使用できている。1996年夏季には、現在進めている館山局のアンテナ・受信系を含むVLBIシステム全体が完成し、KSP全観測局参加による定常観測運用が開始できる見通しが得られた。この時点で、当初の計画通り、世界でも例のないVLBIによる定常的な地殻変動モニターが実現できる。

### 謝 辞

VLBI観測用アンテナ・受信系の整備は、多くの関係者のご協力によって実現できました。特に、アンテナ建設にあたっては、関東電気通信監理局国際監視部(三浦局)及びNTT長距離通信事業本部(館山局)の関係各位から多大なるご協力を得ました。深く感謝申し上げます。実際のハードウェア整備に携わられた日本電気株式会社、日頃から助言とご指導を頂く当所幹部、首都圏広域地殻変動観測施設整備推進本部の横山本部長をはじめ

とする整備班の皆様、時空計測研究推進委員会の高橋富士信委員長、そして各種事務手続き等を担当された総務部門の皆様にも深く感謝申し上げます。

### 参 考 文 献

- (1) 高橋富士信, "2. 首都圏広域地殻変動観測システム(KSP計画)とその科学技術史的背景", 通信総研季, 42, 1, pp.5-13, Mar, 1996.
- (2) 栗原則幸, 今江理人, "宇宙技術による首都圏広域地殻変動観測施設の開発 その1. VLBIシステムの概要", 日本測地学会第88回講演会要旨, pp.11-12, 1994年10月.
- (3) 高羽浩, 栗原則幸, 岩田隆浩, 小山泰弘, 日置幸介, 金子明弘, 吉野泰造, "3.2.4 観測制御システム", 通信総研季, 42, 1, pp.45-54, Mar, 1996.
- (4) 小山泰弘, 岩田隆浩, 高羽浩, 後藤忠広, 金子明弘, "3.2.6 集中制御システム", 通信総研季, 42, 1, pp.63-71, Mar, 1996.
- (5) 栗原則幸, 高橋幸雄, 近藤哲朗, 高羽浩, 岩田隆浩, 小山泰弘, 花土ゆう子, 関戸衛, 中島潤一, 後藤忠広, 吉野泰造, 浜真一, 木内等, 金子明弘, 国森裕生, 雨谷純, 大坪俊通, 今江理人, 高橋富士信, "首都圏広域地殻変動観測計画(KSP)によるVLBI連日観測", 日本地震学会講演予稿集, 1995年度秋季大会, A 31, 1995年9月.