

研 究

## 3.5 KSP における地殻変動観測結果

栗原 則幸* <sup>1</sup>	高橋 幸雄* <sup>1</sup>	近藤 哲朗* <sup>1</sup>	高羽 浩* <sup>1</sup>
岩田 隆浩* <sup>1</sup>	木内 等* <sup>2</sup>	小山 泰弘* <sup>1</sup>	花土ゆう子* <sup>3</sup>
関戸 衛* <sup>1</sup>	高橋富士信* <sup>4</sup>	中島 潤一* <sup>1</sup>	日置 幸介* <sup>5</sup>
後藤 忠広* <sup>1</sup>	今江 理人* <sup>3</sup>	三木 千紘* <sup>6</sup>	細川 瑞彦* <sup>3</sup>
金子 明弘* <sup>2</sup>	吉野 泰造* <sup>2</sup>	雨谷 純* <sup>6</sup>	国森 裕生* <sup>6</sup>
	大坪 俊通* <sup>6</sup>		

(1995年10月16日受理)

3.5 THE PRELIMINARY RESULTS OF THE KSP DAILY  
VLBI EXPERIMENT

By

Noriyuki KURIHARA, Yukio TAKAHASHI, Tetsuro KONDO, Hiroshi TAKABA,  
Takahiro IWATA, Hitoshi KIUCHI, Yasuhiro KOYAMA, Yuko HANADO,  
Mamoru SEKIDO, Fujinobu TAKAHASHI, Jyunichi NAKAJIMA, Kosuke HEKI,  
Tadahiro GOTOH, Michito IMAE, Chihiro MIKI, Mizuhiko HOSOKAWA,  
Akira KANEKO, Taizoh YOSHINO, Jun AMAGAI, Hiroo KUNIMORI,  
and Toshimitsu OOTSUBO

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 four stations with both VLBI and SLR observation facilities are located on Koganei, Kashima, Miura and Tateyama. The VLBI observations are conducted every day to monitor the crustal deformation. The VLBI observation facilities and data processing systems at the Kashima and Koganei stations were completed in January 1995, and 5-hour VLBI experiments started in February 1995. In each experiment the data have been acquired by the rate of 56 Mbps for about 100 observations. The rms scatters of repeatability for about one year are 5 mm in both length and horizontal coordinate and 28 mm in vertical one for 110 Km Kashima-Koganei baseline. As of August 1996, all four stations will be available, and the improved recording rate of 256 Mbps will be routinely carried out. Our final goal which is to achieve 2 mm accuracy in horizontal and subcentimeter one in vertical will be realized in the next summer.

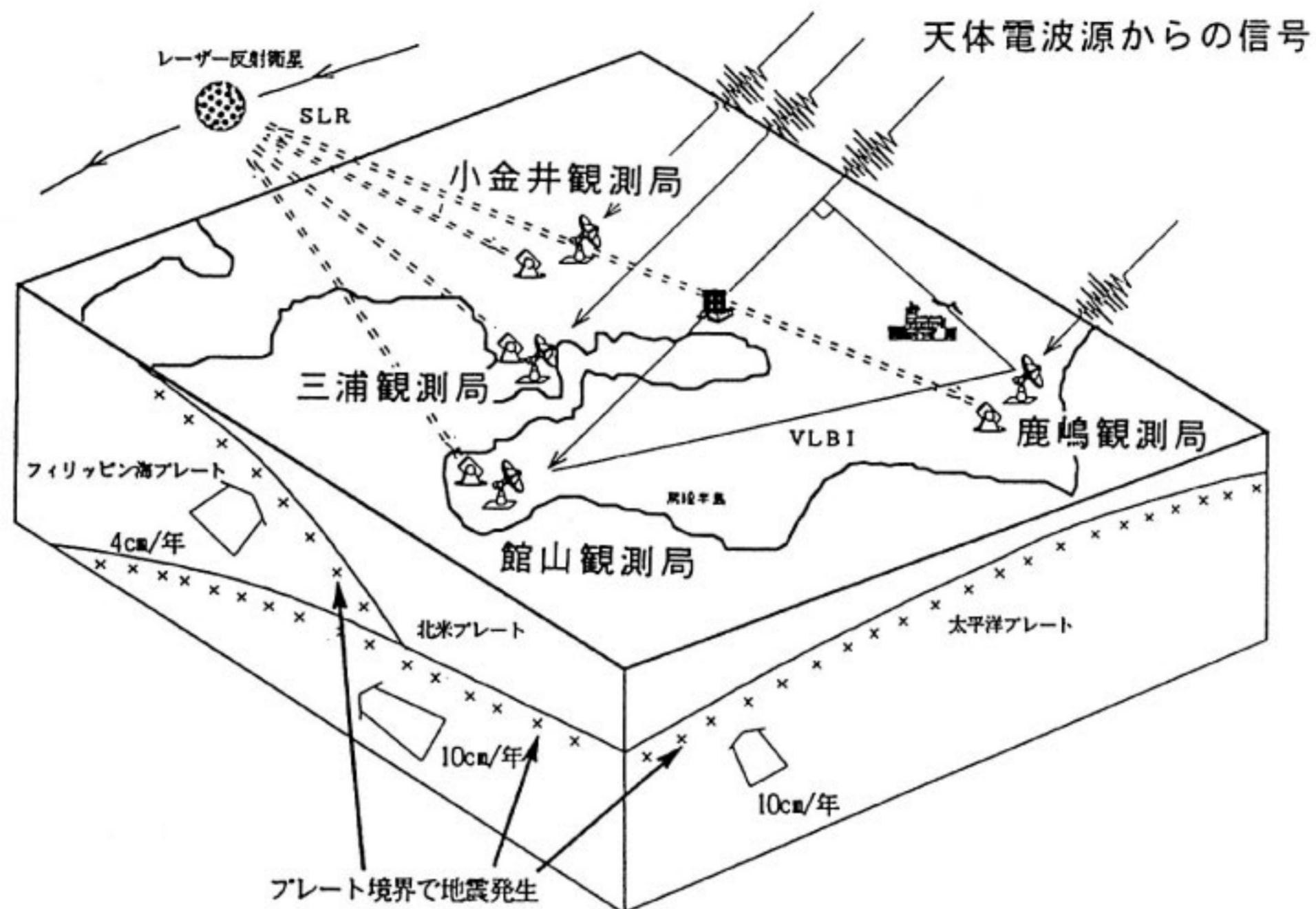
[キーワード] 宇宙測地, 地殻変動, 地震予知, VLBI, SLR.

Space geodesy, Crustal deformation, Earthquake prediction, VLBI, SLR.

## 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。この計画<sup>(1)</sup>は、首都圏4か所（東京都：小金井市『小金井観測局』、茨城県：鹿嶋市

\*<sup>1</sup> 関東支所 宇宙電波応用研究室  
\*<sup>2</sup> 標準計測部 時空技術研究室  
\*<sup>3</sup> 標準計測部 周波数標準課  
\*<sup>4</sup> 標準計測部  
\*<sup>5</sup> 国立天文台 水沢観測センター  
\*<sup>6</sup> 標準計測部 時空計測研究室



第1図 首都圏広域地殻変動観測計画のVLBI及びSLR観測局配置図

『鹿嶋観測局』、神奈川県：三浦市『三浦観測局』、千葉県：館山市『館山観測局』)に専用のVLBI (Very Long Baseline Interferometry: 超長基線電波干渉計) 及びSLR (Satellite Laser Ranging: 衛星レーザー測距システム) 観測局を整備し、宇宙技術を用いた地殻変動の定常観測を目的とする。KSPの観測局整備は、VLBIシステム<sup>(2)</sup>整備を優先的に実施し、小金井局、鹿嶋局、そして三浦局とVLBIデータ取得のための観測局早期立ち上げを積極的に推進した。1995年度には、第4番目の館山観測局整備が進められており、1996年夏季にはVLBIシステム中枢部の役割を果たす小金井中央局機能も充実し、VLBIシステム全体の完成を予定している。KSPで新設するVLBI及びSLR観測局配置を第1図に示す。

現在、小金井、鹿嶋、そして三浦局のVLBI観測データ取得系がほぼ完成し、1日約5時間のVLBI観測を連日続ける世界で例のない地殻変動観測を試験的に実施している。現段階での連日観測は、VLBI観測局としての初期性能評価やKSP本格運用を想定した試験運用としても位置付けている。本論文では、KSPで新設したVLBI観測局を用いた各種実験経緯及び小金井局—鹿嶋局間のVLBI連日観測で得られた予備的な地殻変動観測結果について述べる。

## 2. KSPにおけるVLBI実験

### 2.1 VLBI実験の経緯

KSPのVLBIシステム整備は1993年度分の小金井中央局舎整備を第1歩にスタートした。しかし、各観測局に配備するVLBI観測用ハードウェア整備は、予算上の制約により単年度では実現できない状況が生じていた。さらに、各観測局の無人運用を実現する小金井中央局の遠隔集中制御システム整備も同様の理由で繰り延べとなっていた。一方、1995年1月17日の兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災発生を契機に地震予知研究に役立つ地殻変動観測データの重要性が指摘され始めた。当所はこうした社会的背景の中で、KSP観測局整備を急ぎ、別の用途で保有するVLBI機器の一時流用や研究室職員によるKSP観測運用支援を行なうなど、VLBI利用による地殻変動観測データの早期取得に努めた。

実際の運用としては、小金井局と鹿嶋局間で初めて実施された1994年7月のフリッジ実験を皮切りに、初期性能及び安定動作試験を兼ねた24時間測地実験、1日数時間の測地実験を継続する連日観測等、実験規模を次第に拡大させながら、VLBI観測を現在まで継続している。KSPで定義した実験名称、実験目的等を第1表に示す。これまでの主要実験日と観測相手局等を第2表に示す。

第1表 KSP 実験の実験名称及び実験目的

KSPの実験名称	実験の目的（実験規模）
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ フリンジ実験</li> <li>・ 24時間測地実験</li> <li>・ 連日観測</li> <li>・ 定常観測</li> </ul>	観測局ハードウェアの性能確認を目的とした短時間観測 測地応用を目的とした24時間連続観測 当所の通常勤務時間内で、測地目的とした1日約5時間観測 年間を通じ、測地目的とした1日約5時間観測 但し、状況に応じ24時間連続観測

第2表 これまで実施したKSPVLBI実験及び観測相手局

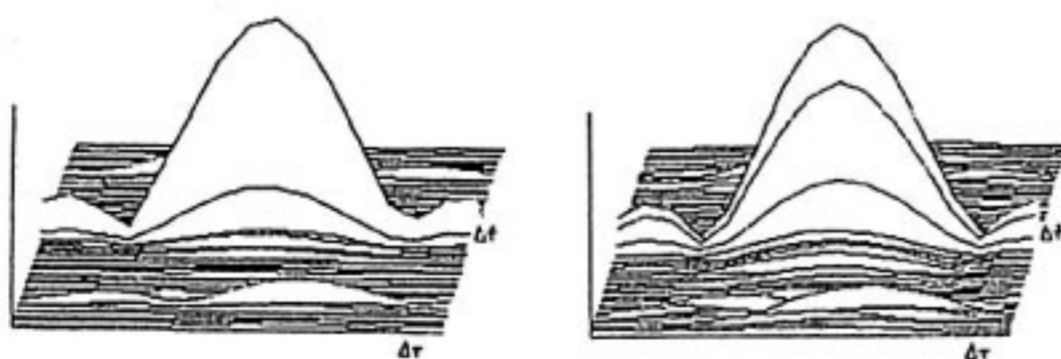
実験の名称	実験実施日	KSP観測局名及び観測相手局		
		『 小金井局 』	『 鹿嶋局 』	『 三浦局 』
・ 初フリンジ実験	1994年 7月25日	鹿嶋局 & 34m局	小金井局	
・ 初24時間測地実験	1994年 8月29日	鹿嶋局	小金井局	
・ 連日観測	1995年 1月31日～	鹿嶋局	小金井局	
・ 初フリンジ実験	1995年 5月12日	鹿嶋局 & 三浦局	小金井局 & 三浦局	鹿嶋局 & 小金井局
・ 初24時間測地実験	1995年 5月22日	鹿嶋局 & 三浦局	小金井局 & 三浦局	鹿嶋局 & 小金井局
・ 定常観測	1995年 12月1日～	鹿嶋局 & 三浦局	小金井局 & 三浦局	鹿嶋局 & 小金井局

第3表 KSP 小金井局及び鹿嶋局の初フリンジ実験

実験目的	アンテナ・受信系及び時刻同期系等の機能試験
参加局	小金井局、鹿嶋局、34m 観測局
実施日	1994年 7月25、26日
観測数	6
電波源	3C84, 3C273B
備考	鹿嶋局：K-3型周波数標準器 観測データ記録レート（56 Mbps）

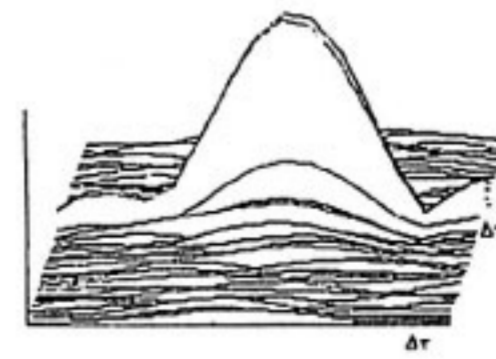
第4表 KSP 三浦局の初フリンジ実験

実験目的	アンテナ・受信系及び時刻同期系等の機能試験
参加局	三浦局、小金井局、鹿嶋局
実施日	1995年 5月12日
観測数	8
電波源	3C84, 3C454.3
備考	鹿嶋局：K-3型周波数標準器 三浦局：ロシア製周波数標準器 観測データ記録レート（56 Mbps）



遅延時間及びその変化率を変えた時の相関振幅を表す  
電波源 3C273B 左図：Sバンド、右図：Xバンド

第2図 KSP 小金井局及び鹿嶋局の初フリンジ実験で得られた相互相関グラフィックス表示（通称：相関の山）



遅延時間及びその変化率を変えた時の相関振幅を表す  
電波源 3C454.3 Xバンド

第3図 KSP 三浦局の初フリンジ実験で得られた相互相関グラフィックス表示（通称：相関の山）

## 2.2 フリンジ実験

フリンジ実験は、新設 VLBI 観測局に対する最初の機能性能試験と位置付けられる。天体電波源からの微弱電波を実際に受信記録し、観測データ取得用機器、観測機器制御系、時刻同期系等、VLBI に不可欠なすべての機能がテストできる。小金井局及び鹿嶋局の初フリンジ実験は、多くの VLBI 実績を有する鹿島 34 m 局も参加し、1994 年 7 月 25 日に実施した。3 観測局参加によるフリンジ実験は、トラブル発生局の特定や、その原因究明にも役立つ。三浦局の初フリンジ実験は、1995 年 5 月 12 日に実施した。KSP で新設した各観測局の初フリンジ実験情報を第 3 表及び第 4 表に、相関処理で得られた相互相関グラフィックス表示（通称：相関の山）を第 2 図及び第 3 図に示す。これらの初フリンジ実験では、すべて初回の観測で相関検出に成功し、初期の目的を達成している。

## 2.3 24 時間測地実験

通常の測地 VLBI 実験は、予め作成された観測スケジュールに基づき、複数の観測局が独立に観測<sup>(3)</sup>を行なう。観測スケジュールは、観測局位置推定を最優先した

アルゴリズムと各観測局性能等を考慮して作成され、1 実験あたり 24 時間程度の観測が設定される。フリンジ実験成功後のステップとして、小金井局と鹿嶋局との間での 24 時間測地実験を計画した。実験目的は、観測局の初期性能試験及び観測データ取得機器の安定動作試験である。この時期は整備年度途中であったため、未配備機器については当所が他の用途で保有する VLBI 機器を一時流用して実験を遂行した。小金井局と鹿嶋局間で初めて実施した 24 時間測地実験概要を第 5 表及び第 6 表に示す。この実験で初めて得られた各観測局間の基線長もこれらの表に併せて示す。

## 2.4 連日観測とその結果

1995 年 1 月下旬、小金井局及び鹿嶋局の VLBI 観測用ハードウェアがほぼ完成した。しかし、小金井中央局の集中制御システム<sup>(4)</sup> 整備完了は年度末を予定していたため、この時点での観測局無人運用は実現できなかった。

そこで、自動運用ソフトウェアの一部を研究室職員が手動操作する半無人運用モードで 1 日約 5 時間の VLBI

第 5 表 小金井局及び鹿嶋局を用いた初めての 24 時間測地実験

実験目的	測地 VLBI 実験（初期性能試験・安定動作試験）
参加局 実施日 観測数 電波源	小金井局、鹿嶋局 1994 年 8 月 29 日 - 30 日（24 時間） 253 19
備考	鹿嶋局：K-3 型周波数標準器、HP 9216 制御計算機使用 ビデオ帯域幅：2 MHz/ch、S バンド 6 ch、X バンド 8 ch（合計 14 ch）
実験結果	基線長（鹿嶋 - 小金井） 109099664.4 ± 6.0 mm

第 6 表 三浦局を用いた初めての 24 時間測地実験

実験目的	測地 VLBI 実験（初期性能試験・安定動作試験）
参加局 実施日 観測数 電波源	三浦局、小金井局、鹿嶋局 1995 年 5 月 22 日 - 23 日（24 時間） 234 17
備考	鹿嶋局：K-3 型周波数標準器使用 三浦局：ロシア製周波数標準器使用 ビデオ帯域幅：2 MHz/ch、S バンド 6 ch、X バンド 8 ch（合計 14 ch）
実験結果	基線長（鹿嶋 - 三浦） 123379074.9 ± 2.4 mm 基線長（小金井 - 三浦） 57734587.4 ± 2.5 mm

観測を連日続ける運用<sup>(5)</sup>を1995年1月31日にスタートさせた。従って、研究室職員が不在となる休祝祭日や集中制御システム構築作業時には観測を休止したが、1995年11月10日までに142日分のVLBI観測データが取得できた。さらに、この連日観測によって観測ハードウェアの性能評価や不具合箇所の発見、実運用による自動運用ソフトウェアの改修(良)作業を繰り返し行った。VLBI連日観測でこうした地殻変動を直接モニターする試みは、世界でも例がない。小金井局-鹿嶋局間で実施したVLBI連日観測概要を第7表に示す。

連日観測で取得した142実験分のデータ処理は、K-3型相関器で相関処理を行い、基線解析はNASA GSFCグループが開発したSOLVE<sup>(6)</sup>を用いて行った。これらのデータ処理・解析法は、国内・国際VLBI実験で十分な実績を有するものである。連日観測の基線解析条件を第8表に示す。鹿島宇宙通信センター34m局は国際VLBI測地網に結合され、KSP鹿嶋局とは位置関係が明

らかなことから、KSP鹿嶋局を位置基準局として解析した。1995年1月1日におけるITRF 93(International Reference Frame 93)で定義される34m局の位置は、次の値である。

$$\begin{aligned} X &= -3997649255 \pm 4 \text{ mm} \\ Y &= 3276690774 \pm 4 \text{ mm} \\ Z &= 3724278838 \pm 4 \text{ mm} \end{aligned}$$

第8表で示した解析条件を基に、連日観測で測定された鹿嶋局-小金井局間の基線長変化を第4図、小金井局の東西成分位置変化を第5図、同じく南北成分位置変化を第6図に、そして鉛直方向位置変化の様子を第7図に示す。これら小金井局位置変化に関する結果をまとめて第9表に示す。

2.5 定常観測

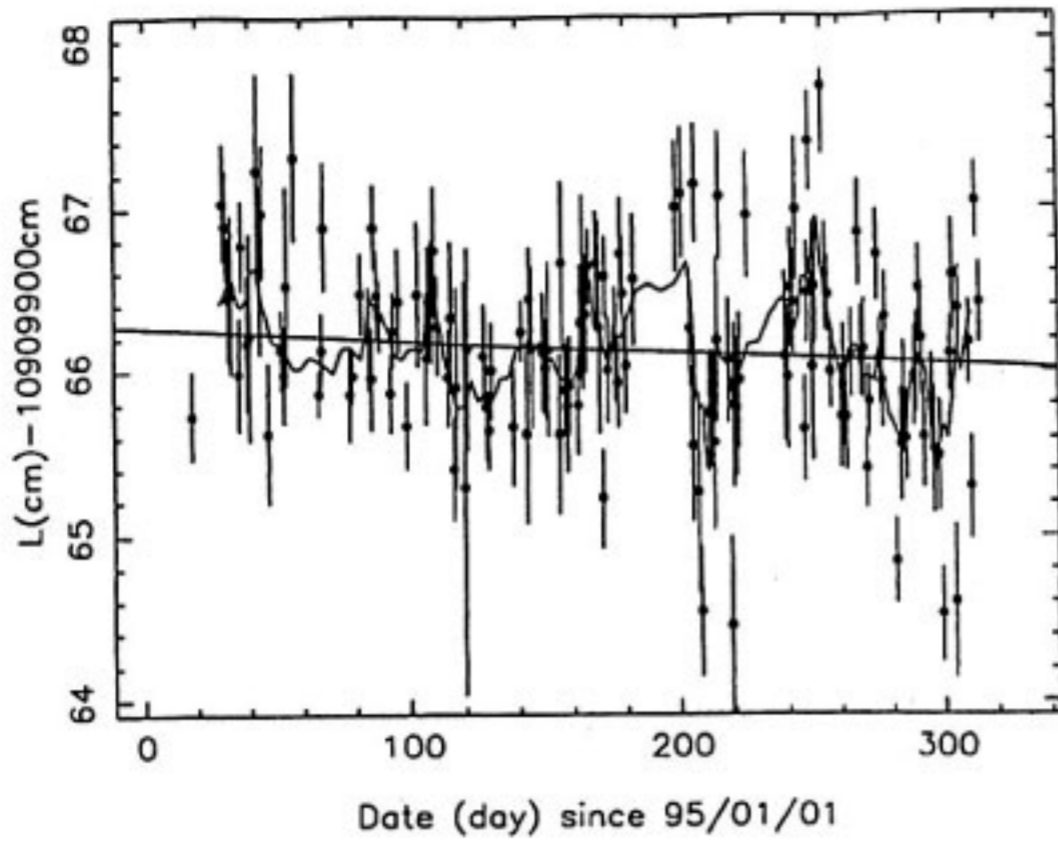
年間を通じ、1日約5時間のVLBI観測を継続するKSP定常観測が1995年12月1日にスタートした。現

第7表 KSP 小金井局-鹿嶋局間で実施された VLBI 連日観測の概要

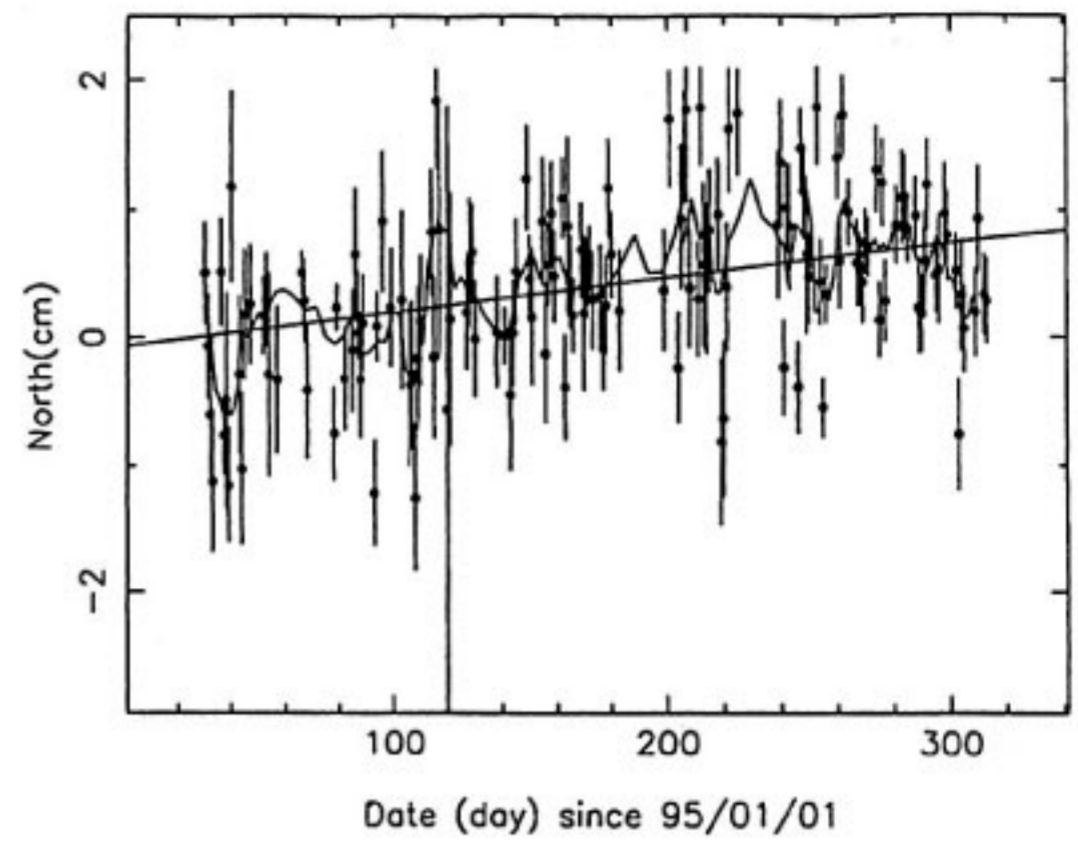
実験目的	測地VLBI実験による地殻変動モニター(運用可能な状況下での観測)
参加局 観測期間 観測時間帯 観測電波源	小金井局、鹿嶋局 1995年1月31日 ~ 1995年11月30日 00:00 ~ 05:30 (UT) 固定 17電波源 0059+581, 3C84, 0420-014, 0537-441, 0552+398, 0727-115, 4C39.25, 3C273B, 3C279, 1308+326, 1334-127, 3C345, NRA0530, 1921-293, 2134+00, 2145+067, 3C454.3
観測周波数	Sバンド : 2104.99, 2124.99, 2194.99, 2274.99, 2314.99, 2324.99 (MHz) X <sub>(L)</sub> バンド : 7794.99, 7824.99, 7884.99, 8064.99 (MHz) X <sub>(H)</sub> バンド : 8274.99, 8424.99, 8544.99, 8574.99 (MHz)
観測数 観測テープ	約100 1巻 : K4型 Lカセット
備考	ビデオ帯域幅 : 2 MHz/ch、チャンネル数 : Sバンド6ch、Xバンド : 8ch 観測データ記録レート : 56 Mbps

第8表 KSP 小金井局-鹿嶋局 VLBI 連日観測の基線解析条件

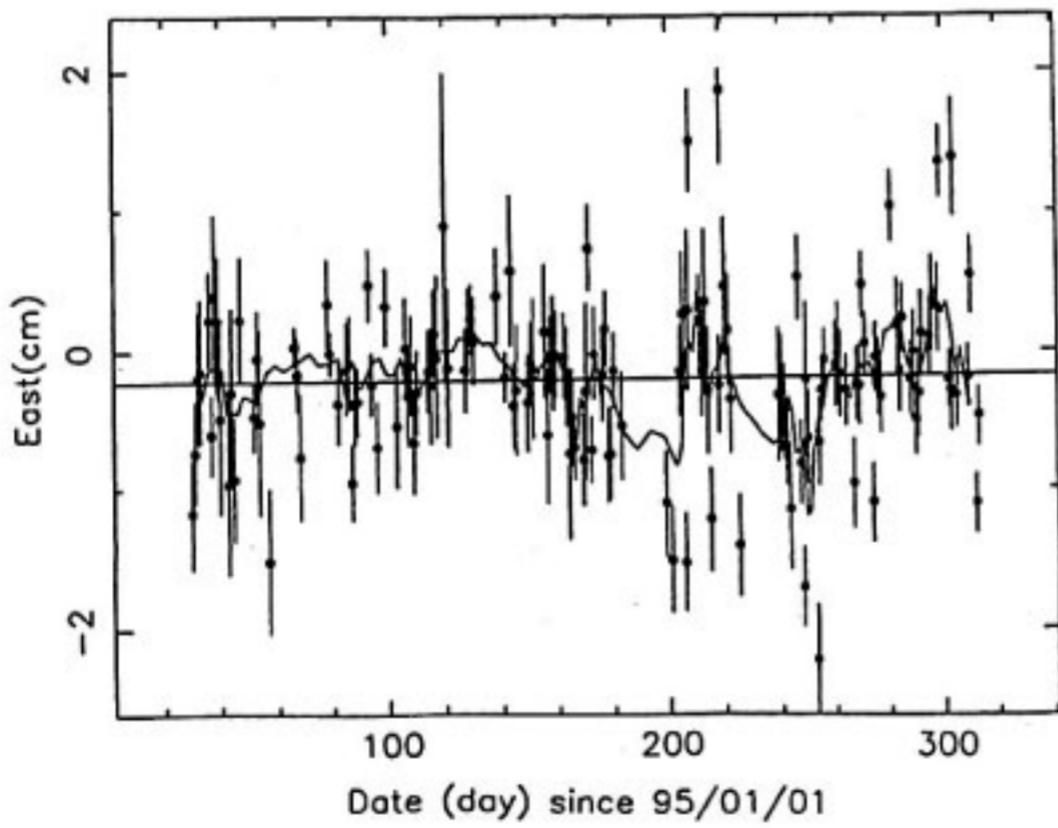
・基線解析ソフト	SOLVE (91.9.1.版)
・地球回転パラメータ	IERS EOP90C04 (Bulletin B 及び Bulletin A)
・章動のオフセット	なし (IAU80モデルによる)
・電波源位置	ICRF93 (IERS Annual Report for 1993)
・位置基準局	KSP鹿嶋局固定 (X = -3997505701, Y = 3276878406, Z = 3724240698 (ITRF93で与えられる1995年1月1日の位置 +ITRF93で与えられる34m局速度による補正))
・解析使用データ	群遅延データ + 遅延時間変化率
・観測良否選択	解析者による個別判断により選択(自動選択でない)
・海洋潮汐	未補正
・クロック	解析者による個別判断により補正(自動補正でない)
・大気遅延	天頂遅延を基に地上気温、気圧、相対湿度の各観測値よりモデル計算



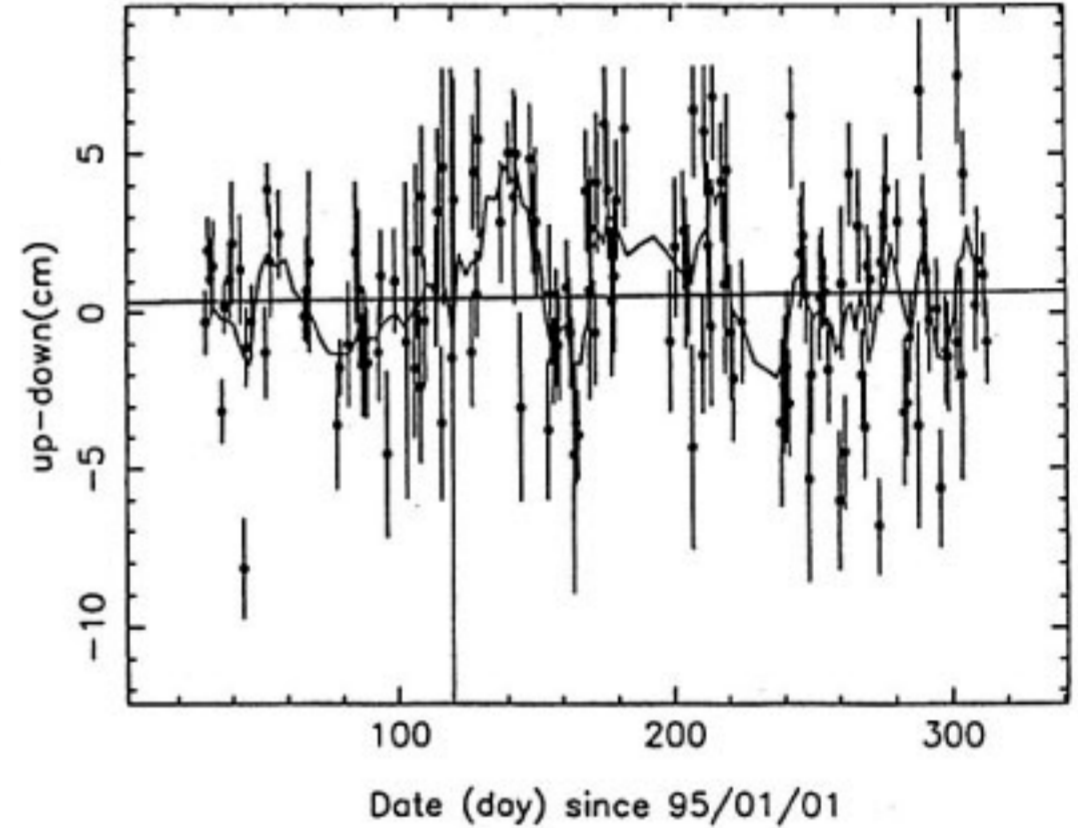
第4図 連日観測で得られた鹿嶋局—小金井局間の基線長変化



第6図 連日観測で得られた小金井局の南北成分位置変化



第5図 連日観測で得られた小金井局の東西成分位置変化



第7図 連日観測で得られた小金井局の鉛直方向位置変化

第9表 連日観測で求められた小金井局の位置変化（鹿嶋局基準）

地殻変動の要素	変化量（測定値）
・ 基線長変化	- 2.7 ± 5.0 mm/year
・ 水平面成分（東方向への）変化	0.5 ± 5.4 mm/year
・ 水平面成分（北方向への）変化	9.9 ± 5.5 mm/year
・ 鉛直方向（上方向への）変化	3.9 ± 27.6 mm/year

第10表 小金井局、鹿嶋局、三浦局、そして館山局が参加する KSP 定常観測の概要

・ 実験目的	測地 VLBI 実験による地殻変動モニター		
・ 参加局	小金井局、鹿嶋局、三浦局、館山局	(*; 館山局は1996年夏季参加 予定)	
・ 観測開始	1995年12月1日 ~		
・ 観測時間帯	01:00 ~ 06:30 (UT) 固定		
・ 観測電波源	16電波源 0059+581, 3C84, 0420-014, 0537-441, 0552+398, 0727-115, 4C39.25, 3C273B, 3C279, 1308+326, 1334-127, 3C345, NRA0530, 1921-293, 2134+00, 2145+067, 3C454.3		
・ 観測周波数:	Sバンド : 2104.99, 2124.99, 2194.99, 2274.99, 2314.99, 2324.99 (MHz) X <sub>(L)</sub> バンド : 7794.99, 7824.99, 7884.99, 8064.99 (MHz) X <sub>(H)</sub> バンド : 8274.99, 8424.99, 8544.99, 8574.99 (MHz)		
・ 観測数	約 100	(*; 1996年春季以降 増加 予定)	
・ 観測テープ	1巻 : K4型 Lカセット	(*; 1996年春季以降 4巻 予定)	
・ 備考	ビデオ帯域幅 : 2 MHz/ch、ch数 : Sバンド 6 ch、Xバンド : 8 ch (*; 1996年春季以降 8 MHz/ch、ch数 : Sバンド 6 ch、Xバンド : 10ch 予定) 観測データ記録レート : 56 Mbps (*; 1996年春季以降 256 Mbps 予定)		

時点では、小金井局、鹿嶋局、三浦局の3観測局による観測が続いている。第4番目の館山局完成時には、全4観測局による定常観測となる。前項の連日観測との違いは、

- ・ 小金井中央局の集中制御機能の充実
- ・ 観測テープ交換集配等の運用を外部委託
- ・ KSP 専用相関器<sup>(7)</sup>の稼働
- ・ KSP 自動データ処理解析システム<sup>(8)</sup>の稼働
- ・ 迅速なデータ処理解析及び結果の公表

が挙げられる。定常観測の概要を第10表に示すが、本稿執筆段階では運用開始直後であることから解析結果等の詳細は稿を改めて報告する。

### 3. ま と め

首都圏広域地殻変動観測計画で先行して進められた VLBI システム整備は、初期に掲げた目標に向かい着実に進展している。世界でも例のない地殻変動モニター専用の VLBI 局として小金井局、鹿嶋局、そして三浦観測局は期待通りの性能を発揮し、フリッジ実験、24時間測地実験、連日観測、そして1995年12月1日からの定常観測運用への移行と順調に経緯している。これら観測局は、アンテナ建設開始約6カ月後にフリッジ実験や測地実験に成功している。観測局立ち上げを短期間で成し得た点は、特筆される。

小金井中央局は、KSP 中枢局としての集中制御システムを用いた各 VLBI 観測局の無人運用を実現している。さらに、各観測局で取得した VLBI 観測データの相関及び解析処理の自動化もほぼ実現している。これらの

VLBI システム整備は、当所が有する VLBI 関連技術の蓄積が十分に発揮されたと言えよう。

1995年1月31日にスタートし約9カ月経過した小金井-鹿嶋局間での連日観測において、

① 基線長で5 mm, ② 水平成分で5 mm, ③ 鉛直方向で28 mmの測定精度(再現性)を得ている。

この連日観測による地殻変動観測結果として、④ 鹿嶋局-小金井局間の有為な基線長変化がない、⑤ 鹿嶋局-小金井局間の有為な東西方向位置変化がない、⑥ 鹿嶋局に対し、小金井局は年間約1 cmの北向き位置変化が見られる等の結論を得た。

今後は、相関処理システムの最終調整を急ぎ、観測データ記録レートを現状の4倍向上させると同時に、観測数の増大を図り、水平成分2 mm、そして鉛直方向9 mm以下の測定精度向上を目指す。

さらに、第4番目の館山観測局の早期立ち上げ、複数基線の同時処理、光ファイバー網を利用した信号伝送によるリアルタイム VLBI システム整備に積極的に取り組み、VLBI 技術を用いたより正確でより迅速な地殻変動モニターを行なう。

### 謝 辞

本計画による地殻変動観測は、多くの関係機関のご協力によって実現されました。郵政本省、関東電気通信監理局、気象庁地震火山部、NTT 長距離通信事業本部、VLBI システム製作メーカー各社の関係各位に対し、深く感謝申し上げます。さらに、日頃から助言とご指導を頂く当所幹部、各種事務手続き等を担当された総務部

門, そして時空計測推進委員会の皆様にも感謝申し上げます。

#### 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.
- (6) Ryan, J.W., Ma, C., and Vandenberg, N.R., “The Mark-III VLBI Data Analysis System”, NASA X-945-80-25, 1980
- (7) 木内等, 高橋幸雄, 近藤哲朗, 関戸衛, 中島潤一, 今江理人, 浜真一, “3.4.1 相関処理装置”, 通信総研季, 42, 1, pp.91-98, Mar. 1996.
- (8) 小山泰弘, 高橋幸雄, 後藤忠広, 日置幸介, “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.

