

CDP 日米 VLBI 実験で得られた電波天文における成果

高橋 幸雄, 高羽 浩, 岩田 隆浩, 花土 ゆう子

〈郵政省通信総合研究所 宇宙電波応用研究室 〒314 茨城県鹿島郡鹿島町平井 893-1〉

杉本 裕二

〈郵政省通信総合研究所 企画課 〒184 東京都小金井市貫井北町 4-2-1〉

通信総合研究所は、米国の装置と互換性を持つ独自の VLBI 装置を開発し、1984 年から CDP(地殻力学計画) VLBI 実験に参加してきた。本年度終了するにあたり、CDP 実験から得られた多くの成果のなかで、電波天文分野での成果について紹介する。高精度な位置とその変化、強度変化、構造の有無と時間変化等の準星の基礎データについて述べる。

1. はじめに

超長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometry: 通称 VLBI) という最新の技術をご存知でしょうか。電波天文用の複数のアンテナで電波星からの微弱な信号を受信し、地球規模の巨大な干渉計アンテナを構築する技術です。この技術は電波天文で発展し、活動的な巨大銀河と考えられている準星 (クェーサ) 等の遠くの天体を、1000 分の 1 秒角 (mas) 以下の超高分解能で観測することを可能にしました。また、1970 年代に開発されたバンド幅合成の登場で、VLBI は“地球規模の物差し”という測位・地球科学の分野でも画期的な成果をもたらし、今や電波天文・地球科学にとって不可欠な技術になっています。VLBI の原理を図 1 に示します。電波源からの信号の到達時間の遅れを、精度 0.1 ns という高精度で測定し、直角三角形という非常に簡単な幾何学で、アンテナ間 (基線) の距離を精度 1 cm で測定することができるのです。通常の実験では 20 個程度の電波星を切り換えながら観測するため、電波星の方向も同時に測定できるので、電波星の位置

や地球回転の観測にも大いに役立っています。

通信総合研究所は、米国のシステムと互換性を持つ VLBI 装置 “K 3 システム” を独自に開発し、地震予知の基礎データのひとつであるプレート運動の実測を目的として、1984 年から CDP (Crustal Dynamics Project: 地殻力学計画) 測地

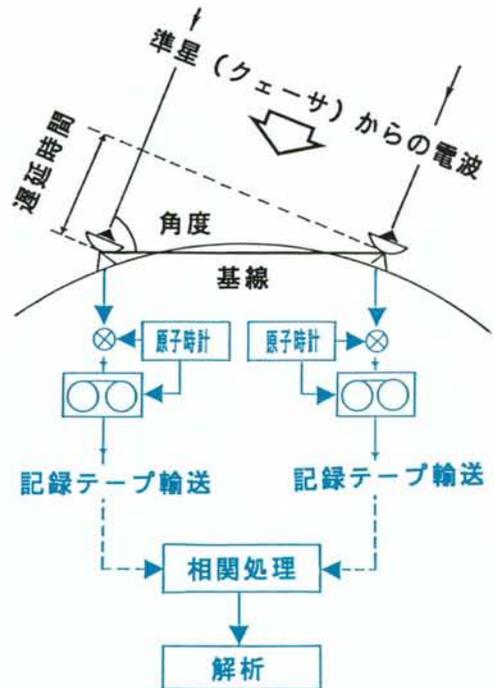


図 1 VLBI の原理及び信号の流れ

Y. Takahashi et al.: Results of Radio Astronomy Obtained by Japan-US VLBI Experiment in CDP

VLBI実験に参加してきました。装置や初期の成果の概要については、以前の天文月報（1985年 Vol.78, No.11）を参照してください。図2に中心的な日米VLBI実験の観測網を示します。このCDPは1991年に終了しましたが、これまで実施されたCDP日米VLBI実験から、国際的なVLBI測位網における日本（鹿島）の正確な位置やプレート運動等が測定されました。図3に、代表的な観測例である太平洋プレート上のハワイ（カウアイ局）と鹿島間の基線長変化を示します。年6.6 cmの速さで、滑らかに日本の方向に動いていることが実測されました。また、プレート境界付近に位置する鹿島が、太平洋プレートにおされて、

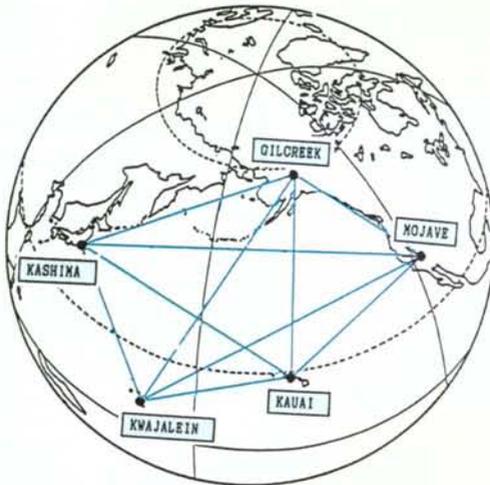


図2 日米VLBI実験の観測局配置

年3 cm程度北西方向に移動していることも測定され、プレート境界での複雑な変化の存在を示しました。さらに、日米VLBI実験からは、主目的である測位的な成果だけでなく、電波天文的にも多くの成果が得られました。そこで、当研究所が参加した1984年から1988年までの実験を用いた電波天文における成果の概要について述べましょう。詳しくは、通信総合研究所ジャーナル（1991, Vol. 38, No.3）を参照してください。

2. 電波源位置

鹿島が参加した1984年から1988年までの82個のCDP実験を用いて、計46個の電波源位置を1万分の1秒(0.1 mas)という超高精度で推定することができました。各観測局の位置とプレート運動、及び各実験毎に地球回転・章動・時計・大気を同時に推定しました。他のVLBIグループであるGSFC (Goddard Space Flight Center) の電波源位置と比較してみたところ、基準点(基準電波源)の定義の違い等による系統的な座標回転を除いた残りの相対位置の違いは、標準偏差で0.3 mas程度とほぼ一致していました。各種電波源カタログを比較しても0.3 mas程度では一致していることから、現在相対位置の信頼度は0.3 mas程度と考えられます。推定方法をいろいろ変えても電波源の相対位置には、ほとんど影響しま

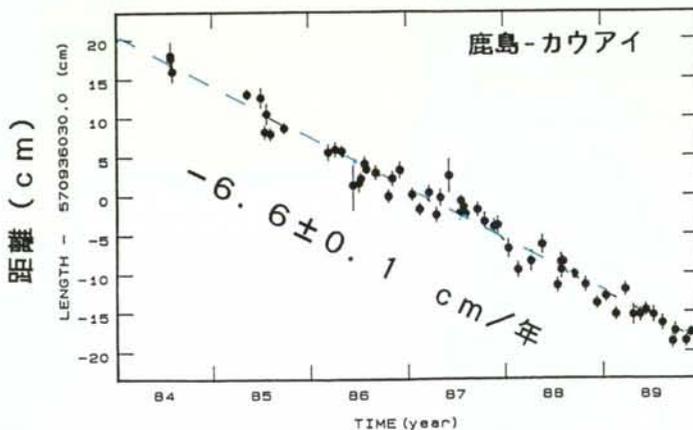


図3 鹿島・ハワイ間の距離変化

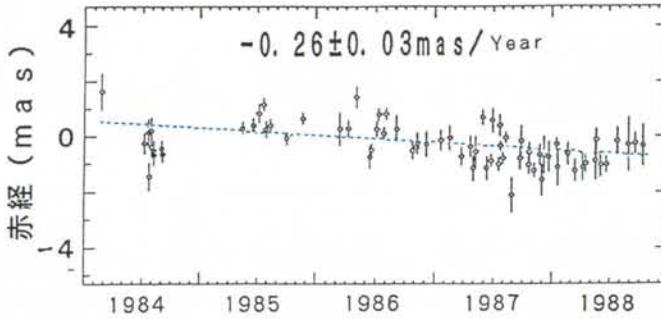


図4 準星3C345の位置変化(赤経変化)

表1 準星の位置変化

電波源	赤経変化 (mas/年)	赤緯変化 (mas/年)
3C273B	-0.13 ± 0.04	0.20 ± 0.06
3C454.3	-0.19 ± 0.02	-0.03 ± 0.03
3C345	-0.26 ± 0.03	-0.08 ± 0.03
OJ287	0.00 ± 0.03	0.02 ± 0.04
4C39.25	-0.05 ± 0.04	-0.15 ± 0.03

せんでした。

数十億光年離れた準星の位置は不変であると思われていますが、果たして本当に不変なのでしょう。構造が分解してみえるいくつかの準星 3C 273 B, 3C 454.3, 3C 345, OJ 287, 4C 39.25 の位置の時間変化を調べたところ、図4に示した 3C 345 の赤経の変化のような年 0.3 mas 程度の有意な変化が見られました。表1に示した5つの電波源のうち4つの電波源で位置変化が見られました。準星の構造の広がりによる影響や準星自体の動き等の、位置変化の原因については今後検討していく必要があるでしょう。

電波源位置に関しては、CDP 実験以外にも、位置の良くわかった電波源が少ない赤緯 -20 ~ -40 度付近の南天電波源を観測するため豪州 (CSIRO) や米国 (NRL) と協力して VLBI 実験を実施し、全天を網羅した 74 個の電波源による基準座標系構築に役立てることができました。

3. 相関振幅・構造

電波源を VLBI のような干渉計で見ると、電波

源の各部分からの信号が重なり合い、見る方向によって強く見えたり弱く見えたりします。VLBI では、受信信号に対する電波源からの信号の割合を示す相関振幅が観測されます。相関振幅の変化は電波源の構造により異なるので、相関振幅を調べることで構造の分解に関する情報が得られます。また、構造が分解されやすいというような曖昧な表現を数値化する方法を新しく考案しました。

電波干渉計の基線ベクトルの射影成分 UV により相関振幅は変化します。まず UV の変化は基線によって異なってきます。そこで、次の5つの特徴的な基線を選び、各基線毎に分解の程度を示しました。①2つの局で見える可視領域は極めて狭いが、ある程度の UV の変化をもち高分解能なデータが得られる 8000 km 程度の東西長基線、②可視領域が広く UV の時間変化が顕著な 5000 km 程度の東西基線、③大きな V を持つ 5000 km ~ 8000 km の南北基線、④中程度の分解能をもつ 2000 km 程度の東西基線、⑤ほとんど構造が分解されない 100 km 程度の短基線です。日米実験は、こうした典型的な基線をもつ好都合な観測網になっています。鹿島・カリフォルニア (MOJAVE) が東西 8000 km 基線、鹿島・ハワイ (KAUAI) が 5700 km の東西基線、ハワイ・アラスカ (GIL-CREEK) が 5000 km の南北基線の3基線に、国内の鹿島・筑波の 55 km 基線を加えた典型的なデータが得られました。

測地 VLBI 実験では 24 時間で、各電波源を切

り換えながら観測するので、UV が異なるいくつかの相関振幅が得られます。構造が分解して見える基線では相関振幅が変化し、標準偏差が大きくなります。この相関振幅の変化は、アンテナ性能や電波源強度によりスケージングされるので、各実験の相関振幅の大きさ(平均値)で規格化しました。

$$A = \frac{\text{実験内の相関振幅の標準偏差}}{\text{各実験の相関振幅の平均値}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2 / N}}{\bar{r}}$$

この規格化された数値(A)は、分子分母で共通な電波源強度(S)や一定の係数は除かれた数値となっていて、実験内のフリンジビジビィティ(r)の変化の程度、すなわち構造が何%相関振幅へ影響するかを示します。各実験内での規格化された標準偏差(A)の全実験での平均値を表2に示します。システム雑音温度や大気によるコーヒレンス損失(Xバンド3分観測で数%)の補正は考慮に

いていませんが、複数の長基線の観測網では仰角による変化は小さいと思えます。実際、表2で相関振幅の標準偏差が数個の電波源で10%以下であり、システム雑音等の仰角変化の影響はこれ以下とみなされます。従って、10%以上の標準偏差の電波源で構造が分解されていると推測されま

す。短基線では(A)の平均値は10%以下で電波源構造はほとんど分解されませんが、5000 km以上の基線では、この数値が大きくなり構造が分解されていく様子がわかります。特に3C345, 3C273B, 4C39.25は、これまで言われてきたように構造が非常に分解され、30%以上も変化しています。鹿島・ハワイ東西基線とハワイ・アラスカ南北基線で数値が異なるのは、電波源が非対称であることを示しています。また、電波源0299+131, 0420-014, 1548+056, 1741-038, 1749+096, 2145+067は、どの基線でも10%以下で、分解されない点電波源とみなすことができます。

(A)の実験による変化を調べることで、構造の

表2 実験内の相関振幅変化の割合(1984~1988)(単位 %)

電波源名	KAS-GIL	KAS-KAU	GIL-KAU	KAS-WOJ	KAS-TSU
0106+013	16.9	15.7	23.1	10.2	5.8
0212+735	21.6	18.2	14.3	27.9	-
0299+131	7.1	5.7	7.0	8.6	5.0
0234+285	13.6	13.2	8.5	15.9	5.9
0420-014	8.6	7.1	7.6	7.7	6.5
0528+134	11.0	7.7	9.6	18.1	-
0552+398	13.9	14.7	12.0	11.9	10.4
OJ287	13.5	10.6	13.4	9.0	10.4
4C39.25	30.8	29.8	33.5	18.2	12.7
3C273B	29.4	29.9	46.8	24.2	9.9
0Q208	15.9	19.0	29.3	20.9	4.6
1548+056	7.8	8.0	14.5	9.5	2.3
3C345	49.5	42.0	27.0	32.9	13.2
1741-038	7.4	5.8	7.7	8.5	-
1749+096	7.1	8.6	6.8	4.6	-
1803+784	12.8	12.7	16.8	15.6	8.4
2134+004	10.6	-	-	11.4	9.8
2145+067	9.9	7.5	10.8	8.5	7.9
3C454.3	21.1	23.6	19.4	15.6	9.5

(7~8%以下:構造分解されない電波源。システム雑音仰角依存性による)

時間変化の有無についての情報を得ることができました。特に 4C 39.25, 3C 273 B, 3C 345, 3C 454.3 などは構造の時間変化が大きく、構造変化を高頻度に観測していくことが重要と思われます。また表 2 で構造が分解されていると見なせる 0212+735, 0234+285, 0552+398, OJ 287, OQ 208, 1803+784 は、相関振幅の時間変化は少ないこともわかりました。

4. 電波源強度の時間変化

準星の電波源強度自体はどの程度時間変化しているのでしょうか。

鹿島・ハワイ・アラスカ 3 基線において、実験毎の相関振幅平均値の時間変化を調べてみました。ほとんどの電波源が、3 基線ともほぼ共通であるが電波源毎には異なる大きな変化を示していました。構造変化によるものであれば基線毎に変化の様相が異なり、またシステムの変化であれば、全ての電波源で共通した変化となります。従って、こうした大きな相関振幅変化は、電波源強度の変化によるものと考えられる。図 5 に 0106+013 の鹿島・アラスカ基線の例を示します。1803+697 や 0106+013 ではパースト的な特異な変化がみられました。こうした強度変化の有無は相関振幅の平均値の標準偏差で数値化することができます。20 個近くの電波源のほとんどが長基線でも 30% 以

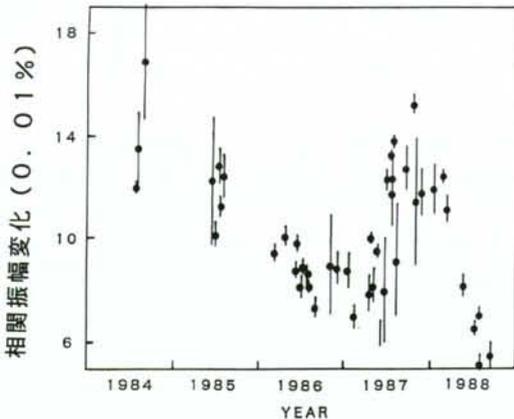


図 5 準星 0106+013 の相関振幅 (電波源強度) 変化 (鹿島・アラスカ基線)

上の時間変化をしていることがわかりました。どうして、こうした巨大なエネルギーの変化をしているのか興味ある研究テーマと思われます。今回は観測数の多い 20 個の電波源について調べましたが、各種電波源の中心付近の強度変化を統計的に検討していくためにも、できるだけ多くの電波源について相関強度の時間変化を観測していくことが大事だと思われます。特に電波源 2200+420 (BL Lac) や 3C 380 などの時間変化は面白いと思われます。

5. 相関強度

相関強度の絶対値は、VLBI 相関振幅の予測計算や電波源の出すエネルギーの評価等で必要となりますが、アンテナの絶対較正や大気損失の評価の難しさにより正確に求めにくいものです。

そこで、基準となる電波源に対する相関強度比を求め、電波源強度の相対的強さの目安を得ることができます。基準になる電波源相関強度を単位として表示したものです。コヒーレンス損失やシステム雑音温度の変動等は各電波源でほぼ共通であるため、この比には影響しないという利点があります。基準となる電波源は点電波源で時間変化の小さいものとして 0229+131 という電波源を選ぶことにしました。この電波源は点電波源に近いので、鹿島・筑波短基線の強度と一致していると考えられます。強い電波源強度の 3C 345 のシングルディッシュ観測結果と、鹿島・筑波短基線 VLBI 実験での 3C 345 と 0229+131 の相関強度比から、0229+131 の Xバンドでの強度が 1.9 Jy と評価できます。この電波源の絶対強度と相関強度比から、基線毎の全ての電波源の絶対強度を求めることができました。

6. 3C 273 B の構造の連続変化

準星 3C 273 B は、強力な電波源で古くから観測され、測地 VLBI 観測に於ける天球座標系の赤経の基準となっています。また、3C 84, 3C 345 と

ともに地上 VLBI で構造が分解される活動的な電波源のひとつで、準星はいったい何なのかという謎の解明に役立つ重要な研究対象です。この電波源の面白い現象のひとつとして超光速現象があります。JPL の Pearson らは、1977 年から 1980 年までの 3C 273 B の VLBI による相関振幅観測から強度分布変化を求めました。その結果、中心核ジェットは位置角 -116° の方向に年 0.76 mas 速さかかっていて、地球からの 3C 273 B の距離(約 8 億 pc) を考えると、この速度は光速を超えてしまいました。これは中心核に比べて遅く放射されたジェットからの電波が同時に地球に到達する見かけ上の現象であると解釈されています。多くの準星は、中心の巨大なブラックホールから高速なジェットが吹き出している活動的な巨大銀河と思われていますが、まだまだ謎の多い天体のひとつなのです。

1986 年 5 月から 1988 年 5 月まで約 2 ヶ月に一度の割合いで鹿島・ハワイ・アラスカ 3 基線で実施された 13 個の XPAC (Trans-Pacific) 実験の相関振幅を使用して、3C 273 B の構造の連続変化を調べてみました。点電波源と考えられる 2145+067 の各基線での相関振幅比を用いて、アンテナのセンシティブリティの違いを補正しました。大気吸収・システム雑音温度の実験毎の違いも同時に

補正されこととなります。相関振幅の大まかな変化から推測された非対称なガウス分布をもつ中心部と円ガウス分布をした第 2 成分(ジェット成分)からなる構造モデルで、3 基線の相関振幅を再現するパラメータを各実験毎に求めてみました。

推定された第 2 成分の位置変化を求めたところ赤経方向に $0.71 \pm 0.06 \text{ mas/年}$ 、赤緯方向に $0.52 \pm 0.02 \text{ mas/年}$ 変化していました。図 6 に示すように、第 2 成分が -127° 方向に速度 0.88 mas/年 で速さかかっていることとなります。この方向は Pearson の結果とほぼ一致しています。また中心部の主軸の広がり(時間変化)を調べたところ、中心部が連続的に伸び縮みしている現象が見られました(図 7)。この中心部の広がりもほぼ -125° と第 2 成分の方向と一致していることを考えると、恐らく第 2 成分の方向にいくつかの小さなジェットが次々に放出され、第 2 成分を励起させていく機構が推測されます。このことは、中心部と第 2 成分の強度比を調べると、中心部が広がっている時に弱く、狭まっている時に強くなる傾向からも推測されます。さらに 1988 年 5 月には、第 2 成分をそれまでの円対称なガウス分布から非対称なガウス分布へ急激に変化させる必要があり、第 2 成分に何か急変な変化があったことがわかりました。

では、こうした構造の変化がどの程度測地 VLBI へ影響するのでしょうか。1987 年 5 月の実験では、3C 273 B の遅延時間が鹿島・アラスカ基線のみで 0.5 ns 以上著しく変化する傾向がみら

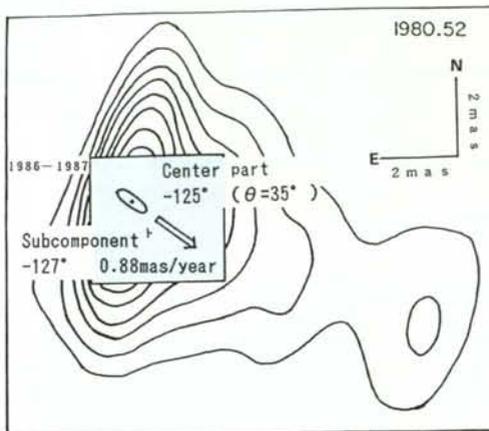


図 6 準星 3C 273 B の電波源分布とジェットの方向 (分布は Pearson による)

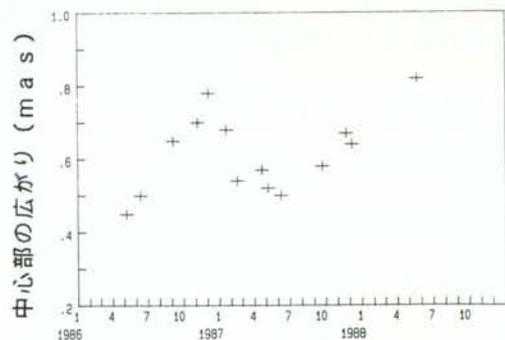


図 7 中心部の広がり(時間変化)

れました。これらの遅延変化は、推定された構造変化から定性的に説明することができました。構造変化による遅延時間変化は大きくても0.7 ns程度で、通常は0.1 ns以下ですが、mm オーダ(0.03 ns 以下) VLBI の時代になりつつある現在では、電波源構造の影響を正確に補正するか、または構造が変化しない電波源を選択していく必要があるでしょう。

7. VLBI の将来は

測地 VLBI 実験は、精度向上をめざし受信周波数の広帯域化が計られ、mm オーダ精度の時代になろうとしています。また、従来の S/X バンド以外にも、精度向上をめざして 22 GHz 帯での測地実験も行われはじめています。1991 年 2 月には、鹿島・イタリア間で 22 GHz 帯測地 VLBI 実験を実施し、相関強度データ取得や基線解析を行うことができました。22 GHz 帯での電波源位置と従来の S/X バンドでの電波源位置の違い、分解能の高い相関強度のデータ、22 GHz 帯でのメーザ源の固有運動など新しい情報を得ることができるようになるでしょう。その他、絶対的な位相(位相遅延)を用いた測地 VLBI 技術の開発も開始されています。

CDP の次計画である DOSE (Dynamics Of the Solid Earth) 計画においても、新しい形で測地 VLBI 実験は継続される予定です。しかし、衛星を用いた GPS (汎地球測位システム) の急速な発展により、地震予知・地殻変動に関する実時間連続測定やアジア地域程度の範囲の測位は今後 GPS が中心になっていくでしょう。測地的な面では、VLBI は高精度を利用して、基準位置の維持・地球全体の形状測定・地球回転の高精度測定などに用いられるでしょう。また、国内外で注目を集めている地球温暖化による海面変動において、潮位(海水面位置) 観測所の地殻変動測定を正確に測定するためにも使用されようとしています。こうした地球環境モニタシステム等の複合システムにおけ

るひとつの技術として応用されていくことでしょう。

天文学的には、米国全土に配置された VLBI アレー(VLBA)、衛星に搭載したアンテナを用いた超長基線による高分解能なスペース VLBI (VSOP)、40 GHz 帯以上の高い周波数での VLBI など、新しい VLBI の時代を迎えようとしています。これらの VLBI から新しい天文学が開けていくことが期待されています。

8. おわりに

これまで述べてきたように、CDP 日米 VLBI 実験はプレート運動等の測地的な成果ばかりでなく、電波天文でも多くの成果を挙げて終了しようとしています。基準電波源の構築や、準星の位置変化、構造の分解の程度の評価、電波源強度の大きな変化、構造の時間変化など、準星の基礎データを取得するのに大いに役だったといえるでしょう。VLBI データにはまだまだ多くの情報が含まれているので、測地中心の CDP、地球回転観測用の IRIS 実験等、これまで行われてきた 1000 個以上の測地 VLBI 実験を取り入れた解析を行い、地球科学だけでなく電波天文でも多くのデータを提供していく必要があるでしょう。

当研究所でも、従来の CDP 測地 VLBI 中心から、地球回転・電波天文も含めた幅広い研究に移りつつあります。300 MHz から 43 GHz 間の 11 バンドの受信系を備えた 34 m アンテナを建設し、国内外の測地 VLBI 実験、地球回転観測、天文観測用の鹿島・野辺山基線での 22 GHz 帯/43 GHz 帯国内 VLBI 実験(KNIFE 実験)、パルサー星の観測、多周波シングルディッシュ観測等を実施し、新しい成果が得られています。