

NICT 鹿島 34 m アンテナを使った研究成果

関戸 衛、川合栄治、氏原秀樹、近藤哲朗、堤正則、宮内結花、長谷川新吾
情報通信研究機構 時空標準研究室鹿島宇宙技術センター

1 はじめに

上陸時の勢力が関東では過去最強となった台風 15 号は、2019 年 9 月 9 日早朝、三浦半島を通過して千葉市付近に上陸し、水戸付近で海上に抜けた。この台風が鹿嶋市を通過した際に、天頂待機状態にあった鹿島 34m アンテナの主鏡は風にあおられて仰角 (EL) 位置が本来の稼働範囲を超えて EL ギアが外れ、EL 駆動モータを破断し、作業用ステージや構造部を破壊した。我々は緊急処置としてアンテナ EL 軸が傾いた状態のまま鋼材を溶接して EL 軸を固定した。主鏡を天頂に戻すことができないため、この後來襲する台風に備えて、9 月中に主鏡パネルをすべて外して風の抵抗をなくす安全対策を実施し、このまま復旧することなく 2020 年に解体する方針となった。34 m アンテナは 1988 年に設置された国内初めて

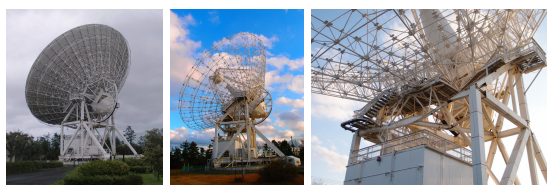


図 1 台風 15 号により EL 駆動部周辺が破壊され、安全対策のため主鏡パネルを取り外した鹿島 34 m アンテナ。

の VLBI 専用の高感度な大型アンテナであり、数億光年かなたの微弱な電波を受信し、その信号を使って精密な観測を行う測地学、電波天文学、宇宙工学の分野で宇宙電波を応用研究するための様々な研究・技術開発に使用されてきた。本稿では、鹿島 34m アンテナが行った研究成果を概観して、その功績の記録としたい。

以下の節では、34m アンテナを活用して実施された研究開発について、NICT が主体的に行った、VLBI 観測による研究・開発、及び単一電波望遠鏡観測による研究開発、と外部機関との共同研究に分けて列挙する。

2 VLBI 研究開発

西太平洋電波干渉計プロジェクト 1970 年代から始まった電波研究所の VLBI プロジェクト [1] は、米国 NASA との共同研究により太平洋プレート運動の検出という成果を上げ、プレート境界に位置する日本周辺のプレートの動きを測定するため、西太平洋電波干渉計プロジェクトを開始した。鹿島 34m アンテナは、1988 年にこのプロジェクトの本土大型局として設置された。設置当初から電波天文学との連携を意識して、1.4-1.6GHz, 2.3GHz, 5GHz, 8.4GHz, 10GHz, 15GHz, 22GHz, 43GHz の多くの周波数を受信する受信機が装備された。西太平洋電波干

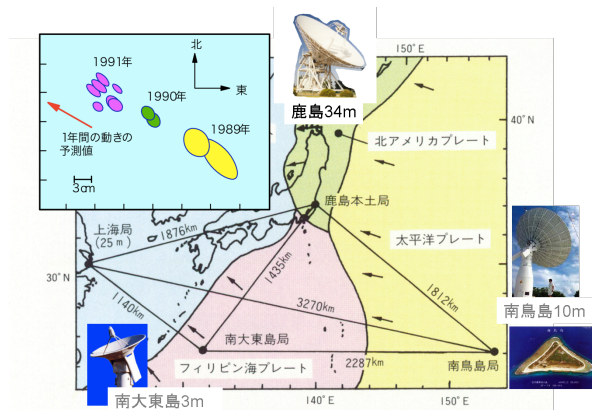


図 2 鹿島 34m アンテナが設置された西太平洋電波干渉計ネットワークとその結果測定された南鳥島の動き (左上)。

渉計プロジェクトは、南鳥島、南大東島、上海天文台 25m アンテナのネットワーク観測を実施し、80.5mm/year のプレート運動モデル NUVEL-1 の予測に近い計測結果を得た [3-5](図 2)。

パルサー位置天文 VLBI 周期的なパルス状の電磁波が観測されるパルサーは、高速で自転する中性子星と考えられており、電波、光、X 線などさまざまな波長で観測されている。パルサーにはパルス周期の安定度が原子時計に匹敵するものもあり、パルスの到着時間を観測するパルサータイミング観測を年間通じて行うことによって、地球の公転を利用してその位置を測定できる。こうして得られるパルサーの座標は使用している力学座標系 (惑星暦) 上の位置である。一方 VLBI 観測によってパルサーの位置を計測すると、それは遠方のクエーサを基準とする天球座標系 (慣性座標系) 上の位置である。この二つの座標系状のパルサーの位置を比較することによって、惑星軌道に基づく力学座標系とクエーサを基準とする慣性座標系の結合ができる。NICT では、1995 年からロシアの Lebedev Physical Institute(LPI) プーシノ電波観測所との共同研究を結び、モスクワ郊外にある Kalyazin64m アンテナと鹿島 34m アンテナの間で VLBI 観測を行って、5 つのパルサーの固有運動を測定した [6]。また、パルサータイミングにより計測された位置と比較することによって DE200 と ICRF の座標系間の回転ベクトル (-7.4, -11.9, -9.1) [ミリ秒角] を得た [7]。

VLBI による宇宙飛翔体の軌道決定 宇宙飛翔体の軌道決定は、日本でも 2000 年前半までは単一アンテナを使って探査機までの距離とその変化率 (R&RR) を観測量として軌道決定を行ってきた。R&RR は、探査機位置の奥行き方向の計測感度は高いものの天球面上の位置には感度が低く、複数日に及ぶ観測と、その期間は人工的な加速

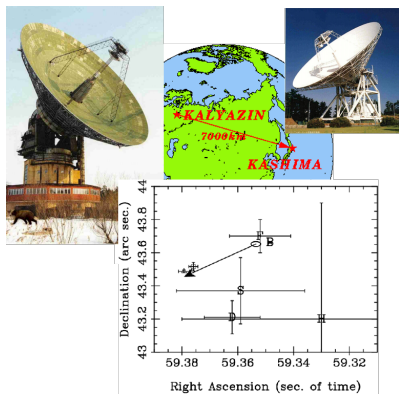


図 3 パルサーの位置天文観測に使用したロシア LPI の Kalyazin64m アンテナと鹿島 34m アンテナ。パルサー B0329+54 の VLBI 観測によって得られた位置と固有運動は非常に精度が高く、我々の観測データ (1995) から得られた固有運動を外挿する Fomalont et al.(1985) の観測結果と整合的な結果となった。

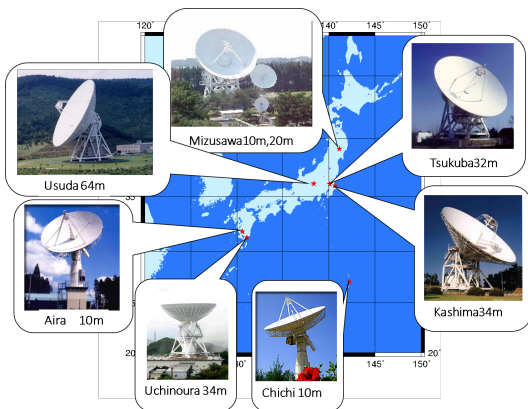


図 4 小惑星探査機はやぶさの軌道決定 VLBI 実験に参加した国内の VLBI 局。

度を加えないようにエンジンを止めた弾道飛行を必要とした。VLBI 観測は天球面上の位置に対して高い感度を持ち、VLBI と R&RR の計測を組み合わせることによって短期間の計測で 3 次元的な探査機の位置が測定可能である。NASA は早くからこのことに注目し、1980 年代の NASA の VLBI 開発・利用の目的の一つは飛翔体の軌道決定であった。

NICT と宇宙科学研究所 (ISAS) は、VLBI を軌道決定に利用する技術開発を目指して 2000 年ころから火星探査機「のぞみ」、小惑星探査機「はやぶさ」の軌道決定 VLBI 実験を実施した (図 4)。NICT はクエーサと飛翔体の相対 VLBI を実施して宇宙飛翔体の天球上の位置を推定する位置天文的な解析を行い [8]、遅延データを ISAS に提供して軌道推定ソフトウェアへの入力データとして軌道決定の精度向上の研究を実施した。このプロジェクトで NICT は、従来のクエーサの観測で使う無限遠の電波源を仮定する VLBI 遅延モデルを改良した有限距離電波源の VLBI 遅延モデルを考案した [9]。その後、NICT から ISAS に異動した竹内央氏らによって VLBI を使った宇宙飛翔体の軌道決定の研究が引き継がれ、現在では

イオンエンジンを推進力とするはやぶさ 2 の主要な軌道決定方法として運用されている。

Realtime VLBI(e-VLBI) VLBI データをリアルタイムに相関局に送り、実時間で相関処理結果を得るリアルタイム VLBI は、ATM 専用ネットワークを利用した首都圏地殻変動プロジェクト (KSP) で実用化された。NICT は、VLBI システムとインターネット技術を融合して観測から結果を得るまでの処理の効率化・自動化のため K5/VSSP システムを開発し [10]、また国立天文台と共同で 1 Gbps のデータをリアルタイムに伝送・相関処理する技術を開発し、国内の VLBI アンテナをネットワークで結合する光結合 VLBI による天文観測が運用された [11]。鹿島 34m アンテナは、研究高速テストベッドネットワーク JGN に接続する利点を活かしてこの実験観測に参加している。

これらのネットワークプロトコルとソフトウェア開発の経験は、ハードウェアに依存しない共通 VLBI データインタフェースとしての VDIIF [12] 制定の基礎となり、2009 年の国際天文年に行われた世界最大のリアルタイム VLBI 観測のイベントに日本から鹿島 34m アンテナが参加した。

また、測地分野においては Mark5B データをドイツ Wettzell からリアルタイムに日本に伝送し、観測 1 時間以内で UT1 の計測結果を得る技術を開発し [13]、国土地理院に技術移転して迅速な UT1 計測を目的とする Intensive 観測の実運用に利用された [14]。

小型 VLBI システムの開発 VLBI の開発が始まった 1970 年代から小型 VLBI システムを使った測地 VLBI が待望され、米国の CDP やドイツ BKG の TIGO などの海外だけでなく電波研究所時代から国土地理院と協力した小型 VLBI システムの開発が行われてきた。2010 年ころには、NICT と国土地理院が共同で人手による分解・組み立てが可能な 1.6m 直径の可搬 VLBI システムを開発し、国内基線で 2.7mm の Formal error を達成した [15]。この観測では小型アンテナ間のフリッジを直接得ることなく、閉合遅延関係を利用して大型-小型のアンテナ間の遅延量の線形結合から小型-小型アンテナ間の遅延量を算出し、これを解析する手法を用いている。2012 年以降は、この可搬型小型 VLBI システムをベースに、IVS の進める VGOS に対応した 3-14GHz の広帯域受信機 [16]、及び高速データ取得システムを開発し [17]、原子時計の精密周波数比較に応用する研究を進めてきた。このシステムの測地性能は、基線長再現性はつくば-小金井の 70 km 基線で 2.6mm [18]、小金井-Medicina の 8870km 基線で 15mm を達成した。また精密周波数比較性能においても相対的な周波数差を -16 乗台の前半の精度で計測することに成功し、現在論文を準備している。小型可搬アンテナを使った測地や周波数比較は、図 5 に示すように大型アンテナによる信号対雑音比 (SNR) の改善を通じて実現しており、鹿島 34m アンテナはこのような新スタイルの観測技術の開発において活躍した。

3 単一電波望遠鏡としての研究利用

電波天文観測 22GHz, 43GHz の観測ができる野辺山 45m アンテナに次ぐ大型の電波望遠鏡として、単一鏡を使ったサーベイ観測が行われ、多くの水メーザ減が発見された [19]。

小惑星レーダ観測 惑星レーダ観測は電波科学研究の一手段であり、小惑星など小さな太陽系天体のレーダ観測の技術実証研究が 34m アンテナを使って実施されている。1991 年に発見された小惑星 6489 に対して、米国 Goldstone 70m アンテナから送信された 8.5GHz の電波をウクライナの Evpatoria の 70m アンテナと日本の鹿島 34m アンテナで受信するバイスタティックレーダ観測が実施された。この観測によって 5 分角の精度であった小惑星の位置が数ミリ秒角で決定され、レーダエコーの解析から小惑星の自転周期などの情報が得られた [20]。この観測を記念して、観測を実施した (GOL)dstone, (EV)patoria, (KA)shima の頭文字から小惑星の名前が GOLEVKA と命名された。

パルサータイミング観測 パルサーの中でも比較的磁場が弱く回転速度の速い「ミリ秒パルサー」のパルス周期は原子時計に匹敵する非常に高い安定度を持つとされ、天文学的な関心だけでなく計量標準の研究機関も地上の時系と独立した長期安定度に優れた時系として注目し、研究開発を行った。NICT(当時の通信総合研究所)では、北天で最も電波強度が高いミリ秒パルサー PSR1937+21 を中心にパルサーを使った時系の構築を目指して鹿島 34m アンテナを使ったパルサータイミング観測を実施した。精度の高いパルサーのタイミング信号を得るには、星間電離媒質による周波数分散(周波数ごとに伝搬遅延が異なる)の影響を補正して広帯域の信号を加算する必要がある。このために音響光学素子(AOS)を使った分光計を組み込んだパルサータイミング観測システムを開発し 1997 年から 2005 年まで主に S-band(2.2GHz)の周波数で観測を行った [21]。その結果、34m アンテナで観測したデータで直径 300m のアレシボ電波望遠鏡に迫る -14 乗台の周波数安定度を得ている(図 6)。

また、前述のロシア LPI のプーシノ電波天文観測所との共同研究に基づいて、1997 年から 2002 年までの鹿島 34m 及びロシアの Kalyazin64m アンテナでそれぞれ 2.2GHz 及び 600MHz の周波数で観測したパルサー PSR1937+21 のタイミング観測の結果から、星間電子密度の指標である Dispersion Measure (DM) が $-0.00114(3)$ pc cm³ yr⁻¹ の割合で変化していることを発見した [22]。その後、周波数標準器の発展によりさらに高い周波数精度が得られる原子時計が開発されるようになり、NICT におけるパルサーを使った時系構築のプロジェクトは 2005 年ころ終了した。

パルサーのジャイアント電波パルス パルサーの信号は一般に数 mJy 以下と微弱であり、数百～数千周期のパルス

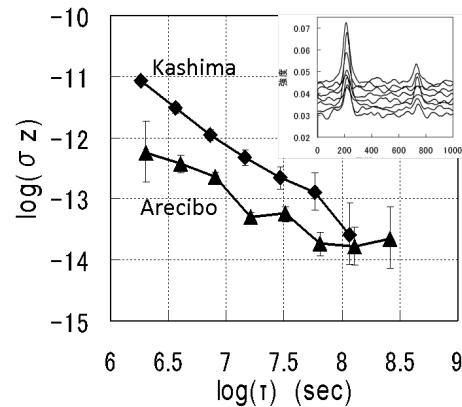


図 5 鹿島 34m アンテナで観測した PSR1927+21 のパルス波形(右上)とタイミング観測で得られた PSR1937+21 の周期安定度。

を積算してパルス波形を検出するが、いくつかのパルサーでは単発のパルスが数 MJy の巨大なパルスを電波領域で放射するものがあり、このようなパルスは GRP(Giant Radio Pulse)と呼ばれる。GRP の放射機構は未だ謎のままであり、主に単一電波望遠鏡を使った観測により研究が進められている。我々は、国立天文台の寺澤敏夫教授らとの共同研究により GRP の観測を行い、東北大学(飯舘 31m)、茨城大学(高萩 32m)、宇宙科学研究所(臼田 64m)と連携して 320MHz, 1.6GHz, 2.2GHz, 6.6GHz, 8.4GHz, の複数の周波数で同時に GRP を観測し、広帯域の周波数スペクトル指数を測定する [23] などの成果を上げている。また、鹿島 34m と臼田 64m アンテナが共同で GRP の VLBI 観測を行い、フリッジ検出に成功している [24]。

惑星間シンチレーション観測 クエーサのように非常に小さい天体の信号は空間コヒーレンスが高く、太陽風の電子密度揺らぎによって地上の電波望遠鏡で観測した信号の強度が変動する(シンチレーション)。この惑星間シンチレーション(IPS)の強度変動スペクトルを異なる周波数で観測すると、密度揺らぎの大きさとその移動速度が推定される。太陽風の太陽離隔を変えながらシンチレーションを観測すると太陽風の速度が太陽からの距離に応じて変化する様子が測定できる。名古屋大学との共同研究によりこのような IPS 観測が行われ、太陽からの太陽風の吹き出し速度が太陽から離れるに従って加速している様子がとらえられている [25-27]。

4 その他の研究への貢献

木星シンクロトロン放射 東北大学との共同研究により、木星シンクロトロン放射機構の解明に向けた研究が行われた。東北大学の研究者が鹿島を訪問し、木星磁場のシンクロトロン放射(JSR)を鹿島 34m アンテナの 2.2GHz, 8.4GHz の周波数で観測した結果、JSR の短期変動が太陽の紫外線(UV)、極端紫外線(EUV)の変動と相関があ

ることを発見し、JSRの放射機構の解明に貢献した研究がなされた [28]。

VSOP への貢献 宇宙科学研究所は世界初の衛星と地上の VLBI 観測プロジェクト (VSOP) を進め、VSOP 衛星 (はるか) は 1997-2004 年の機関運用されて様々な天体の高精度な VLBI 観測を実施した [29]。はるか衛星は、1.6GHz, 5GHz, 22GHz の受信機を搭載し VLBI 観測を行った。これらの周波数で VLBI 観測可能な観測局は日本国内では、1.6GHz は鹿島 34m と白田 64m、5GHz は鹿島 34m のみであったため、VSOP プロジェクト立ち上げの最初のフリンジテスト観測や、VSOP の観測対象である活動銀河核 (AGN) のサーベイ観測 [30] において、鹿島 34m アンテナが重要な貢献をした。

大学 VLBI 連携観測 日本国内には、大学の研究活動として電波天文観測を目的とした VLBI 観測を実施する国内 VLBI ネットワーク (JVN) が、山口大学が中心となって運用されており、茨城大学、山口大学、岐阜大学、北海道大学 (2015 年運用停止)、筑波大学 (国土地理院 32m アンテナ)、NICT の鹿島 34m アンテナが参加している。JVN は 2005 年から 2019 年に至るまでに 40 編以上の論文を生産する活発な研究活動が行われており、これらの大学で学んだ学生が国立天文台や国土地理院などの VLBI 研究者として巣立ち、人材育成にも貢献している。

5 まとめ

鹿島 34m アンテナは、VLBI を研究する宇宙電波応用研究室 (現時空標準研究室) の管理のもと、開発研究の重要な試験研究施設として、また国内国外の多くの測地・天文観測に参加し日本の電波天文・測地・宇宙工学の分野の研究に貢献した。本稿ではアンテナが設置された 1988 年から 2019 年の間に行われた、鹿島 34m アンテナを使った観測的研究成果を概観して紹介した。VLBI の観測装置・相関処理装置・ソフトウェア・解析システム・受信機の開発などの研究成果はここに記載できなかった。34m アンテナの成果については通信総合研究所季報特集号 [31] も参照されたい。

謝辞

設置から 30 年を経過するまでアンテナが安定して運用してこられた背景には、アンテナの維持と改良に努力された多くの方々のおかげである。直接アンテナの維持に努力して頂いた皆様のお名前を挙げ、感謝の意を表したい。当研究室の担当職員 (栗原則幸氏、中島潤一氏、大久保寛氏、竹内央氏)、株式会社理経 (水野保孝氏、渡辺祐樹氏、鈴木茂男氏)、TIW (Pat Ram 氏、Jay Brown 氏)、株式会社ナカゾノ (中園薫氏、中園光輝氏、石津浩一氏)、株式会社エイ・イー・エス (鈴木隆氏)、青塚電気工事株式会社 (米川剛氏)。ここにお名前を挙げる事ができな

かった方も含め、これまで 34m アンテナの維持・改善に努力して頂き心から感謝します。

References

1. 超長基線電波干渉計 (VLBI) 実験特集号, 電波研究所季報, **24**, 130, 443-619, 1978.
2. 日置幸介, 通信総合研究所季報, **36**, 特 8, 15-22, 1990.
3. Kondo, T., et al., J. Geod. Soc. Japan, **38**, 3, 293-308, 1992.
4. Koyama, Y., et al., Proc. CRCM93, 117-122, 1993.
5. Koyama Y., J. Geod. Soc., Japan, **42**, 1, 43-57, 1996.
6. Sekido, M. et al., Publ. Astron. Soc. Japan, **51**, 595-601, 1999.
7. Sekido, M., PhD. Thesis, Graduate Univ. of Advanced Study, 2001
8. Sekido, M., et al., Proc IVS 2004 General Meeting, 258-262, 2004.
9. Sekido, M. & T. Fukushima, J. Geod., **80**, 3, 137-149. 2006.
10. Kondo, T., et al., J. Geod. Soc. Japan, **54**, 4, 233-248, 2008.
11. 藤沢健太、他, 通信総合研究所季報, **47**, 1, 47-57, 2001.
12. Whitney, A., et al., Proc. IVS 2010 General Meeting, 192-196, 2010.
13. Sekido, M., Earth Planets and Space, **60**, pp.865-870, 2008.
14. Matsuzaka, S., et al., Proc. IVS 2010 General Meeting, 143-147, 2010.
15. Ishii, A., et al., Proc. IVS 2010 General Meeting, 55-59, 2010.
16. Ujihara, H., et al., Proc. International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World, APR. doi:10.1007/1345_2018_41, 2019.
17. Sekido, M., et al., IVS 2010 General Meeting, 25-33, 2010.
18. 関戸 衛, 他, “広帯域 VLBI システムの開発と測地, 周波数比較実験の報告”, 日本測地学会誌, **63**, 3, 157-169, 2018.
19. Takaba, H., et al., Publ. Astron. Soc. Japan, **53**, pp.517-533, 2001.
20. Hudson R. S., et al., Icarus, **148**, 37-51, 2000.
21. Hanado, Y., et al., Publ. Astron. Soc. Japan, **54**, 305-313, 2002.
22. Ilyasov, Yu. P., et al., Astrn. Lett., **31**, 30-36, 2005.
23. Mikami, R., et al., Astrophys. J., <http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/832/2/212>, 2016.
24. Takefuji, K., et al., Publ., Astron. Soc. Pacific., doi:10.1088/1538-3873/128/966/084502, 2016.
25. Tokumaru M., et al., J. Geomag. Geoelectr., **43**, 619-630, 1991.
26. Tokumaru M., et al., J. Geomag. Geoelectr., **46**, 835-849, 1994.
27. Tokumaru M., et al., J. Geomag. Geoelectr., **47**, 1113-1120, 1995.
28. Miyoshi Y., et al., Geophys. Res. Lett., **26**, 9-12, 1999.
29. Hirabayashi, H., et al., Sci., **281**, 1825-1829, 1998.
30. Hirabayashi, H., et al., Publ. Astron. Soc. Japan, **52**, 997-1014, 2000
31. 通信総合研究所季報, **47**, 1, 1-203, 2001.