

福井工業大学学部生による 手作り望遠鏡を用いたパルサー観測報告



宮本

宮本 祐介¹・阿部 直央¹・北原 陽向¹・
黒川 達也¹・坂野 友哉¹・佐々木 考晃¹・
高田 友一¹・畑 佐隆文¹・濱田 星矢¹・
増永 裕人¹・濤崎 智佳²・浅山 信一郎³

〈¹ 福井工業大学工学部電気電子情報工学科 〒910-8505 福井県福井市学園 3-6-1〉

〈² 上越教育大学自然・生活教育学系 〒943-8512 上越市山屋敷町 1 番地〉

〈³ SKA Observatory, Jodrell Bank, Lower Withington, Macclesfield, SK11 9FT, UK〉

e-mail: ymiyamamoto@fukui-ut.ac.jp

福井工業大学学部生が自作した3Dコーナリフレクタアンテナで、413 MHz帯において電波パルサー（PSR B0329+54）の検出に成功したのでそれを報告する。学生の手作り望遠鏡では本邦初のパルサー検出に至ったという点だけでなく、無線周波数干渉（RFI: Radio Frequency Interference）が大きな市街地においてもパルサーの検出を実証できた点でも本実験成功の意義は大きい。市街地にある大学構内、かつ、ネット通販で購入できる部材のみ用いた簡易で安価な望遠鏡でもパルサー観測を行えることを示した本結果は、日本国内の大学等における学生実験やデータ解析実習課題にも活用できるだろう。

1. はじめに

近年の天文アーカイブデータの充実は、学部生でも最先端の研究に容易に触れることを可能にしており、天文学の発展という意味では非常によい時代となっている。その一方で、天文プロジェクトの国際化及び大型化により、大学・研究室規模で電波望遠鏡を作製・運用する機会は減少し、学生が電波望遠鏡のハードウェアや観測手法、生データに触れる機会が少なくなっているという側面もある。第117巻2号[1]にて報告された3Dコーナリフレクタアンテナ（以下3DCR）によるパルサー検出を、大学における学生実験等の題材とすることを念頭に、福井工業大学の有志の学部2,3年生と実践した。

実際の作業は2025年1月30日（木）の午前か

ら開始した。3DCRの作製にかかった時間は、学生へのブリーフィング、アンテナ設置場所（福井工業大学屋上）の整地も含めて実質1日半程度であり、1月31日（金）の夕方から観測を開始することができた。

2. 福井工業大学での3DCR製作

電波天文観測で受ける無線周波数干渉（RFI: Radio Frequency Interference）は近年深刻な問題となっている[2]。天体からの電波は極めて微弱であるため、人間活動に伴う人工電波が混信するとかき消されてしまう。また電波天文観測では微弱な天体信号を検出するために高感度な受信システムが必要となる。そのため強烈な人工電波が直接混入すると受信部が飽和して感度抑圧が起きたり、最悪の場合には受信部が破壊される可能性

もある。福井市の中心部に位置する福井工業大学にて3DCRによるパルサー観測を行う際の観測周波数として、3DCRの寸法を考慮し、また408 MHz帯が電波天文業務が優先的に使用できるよう周波数が割り当てされているため[3]、410 MHz付近とした。

3Dコーナリフレクタアンテナ[4]は、一辺が3波長以上の直交する3枚の反射面と一次放射器であるモノポールアンテナから構成され、非常に簡単な構造であるため安価で容易に製作が可能であ

る。410 MHzにおいては一辺が2.2 m (3波長) 程度となる。アンテナ工学に対する理解を深めるための実践演習として、3DCRの電磁界シミュレーションを学生達に行ってもらった。学生のWindows PCにフリーの電磁界解析ソフトOpenMOM Version3.0.1 [5]をインストールしてもらい、モーメント法による電磁界解析を行って3DCRの寸法や共振周波数が410 MHz付近となっていることを確認してもらった(図1)。

教育用望遠鏡としての応用のため、3DCRは誰でも入手可能な物品で手軽に安価に製作できることが望ましい。そのため3DCRの枠組みには通販サイトの軽量ラック支柱Lアングル(長さ2.4 m)を用いた。また、反射板として目開き10 mm, 線径0.7 mmの亜鉛亀甲金網を用い、これを結束バンドでLアングルに固定した。3DCRの設置場所として福井キャンパス屋上を選定したが、組上げ前に、屋内でLアングルをどのような組めば枠が安定するか、など学生達に意見交換してもらいながら仮組みを行った。屋上でアンテナを組み上げる際、降雪はほとんどなかったものの、前日までの雪が残り、寒風吹きすさぶ悪条件の中、学生達は雪かきも厭わず、3DCR製作に取り組んだ(図2)。

また、電波受信部であるモノポールアンテナの製作を通して、簡易ベクトルネットワークアナライザ(nanoVNA [6])にて共振周波数を確認しな

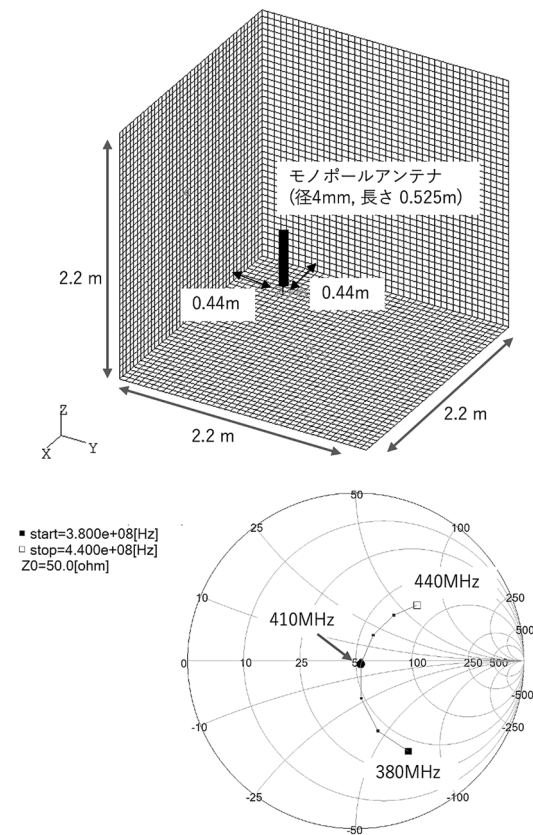


図1 (上) OpenMoMでの3DCRの3次元モデル。設計中心周波数410 MHzでは1片の長さが2.2 mとなる。4 mm径で長さ0.525 mのモノポールを、反射面から0.44 mの位置に配置している。(下) 電磁界解析結果(スミスチャート)。410 MHzがスミスチャートの中心に位置し、インピーダンスマッチングが取れていることが確認できる。



図2 (左) 屋内での3DCR仮組みの様子、(右) 屋上での3DCR組み立ての様子。

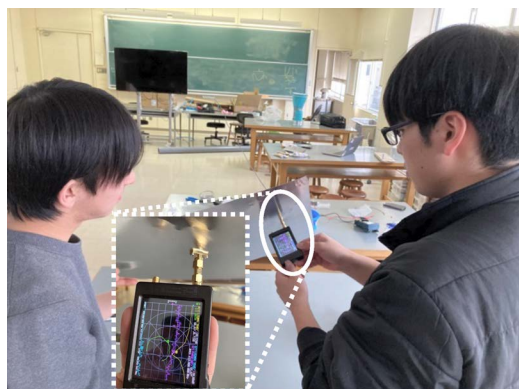


図3 簡易ベクトルネットワークアナライザによって作製したモノポールアンテナの共振周波数の確認。

からエレメント長を調整するという実習を通して電波観測装置の評価手法を学んでもらった(図3)。

福井市の中心部にある福井工業大学福井キャンパスはラジオや地上デジタルTV放送、携帯電話や無線LANなど電波を使ったサービスがあふれており、宇宙からの微弱な信号を覆い隠してしまう。学生達により作成されたモノポールアンテナを用いてRFIの確認を行ったところ、あまたの強力な人工信号が受信された(図4左下)。非常に大きなRFI信号が初段の低雑音増幅器(Low Noise Amplifier: LNA)を飽和させてしまい、このままでは観測ができないことが確認できたので、初段のLNA前にRFIを除去するためのフィルタを挿入する必要が生じた。初段のLNA前の損失はそのまま観測システムの雑音指数(Noise Figure: NF)の悪化となり検出感度が劣化するため、挿入するフィルタの損失は出来る限り小さくする必要がある。そのためmini-circuit社の低損失Low-Pass Filter (SLP-450+)を3DCRとLNAの間に挿入し、地上デジタルTV放送で使用されている470-710 MHz帯や700, 800及び900 MHzで携帯電話等で利用されている周波数帯(プラチナバンド)のRFIを抑制した(図4右下)。410 MHz付近のRFIの混信状況を精査した結果、413 MHz付近が比較的RFIが少ないのでこの周波数を観測

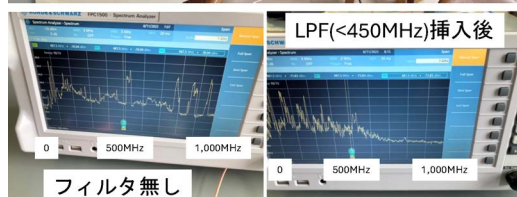


図4 (上) スペクトラムアナライザと作製したモノポールアンテナによるRFI確認の様子。(左下) 福井工業大学福井キャンパスにおける平日日中のRFI確認結果。非常に多くの人工電波が飛び交っていることがわかる。(右下) LPFをアンテナと初段のLNAに挿入した結果。450 MHz以上のRFIが抑制されていることが確認できる。

周波数として採用した。

3. パルサー (B0329+54) 観測

図5に観測システムのブロック図を示す。LNAは3DCR直下に設置するため、バイアス-Tを用いて同軸ケーブルにDC-5 Vを重畳して電源供給している。LNAはmini-circuit社のZKL-33ULN-S+を用いた。3DCRの受信信号はLNAの後、SMA同軸ケーブルコネクタ(30 m)で屋上から実験室に引き込んでいる。受信信号はBand Pass Filter(中心周波数 $f_c=408$ MHz, 帯域幅(BW)=20 MHz)でさらなるRFI除去を行いソフトウェア無線(SDR: Software Defined Radio)受信機(Airspy mini[7])に入力している。観測用PCとしてMacbookを使用し、USBポートからLNA用のDC-5 Vを供給することで観測システムを簡素化

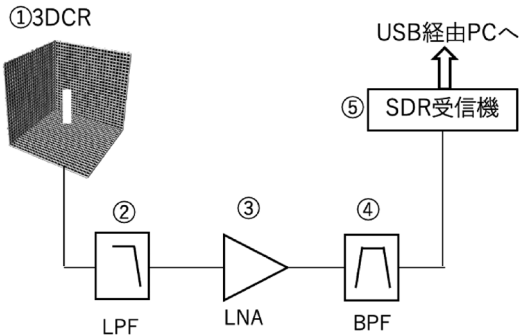


図5 観測システムのブロック図. ①3D コーナリフレクタアンテナ, ②LPF (SLP-450+), ③LNA (ZKL-33ULN-S+), ④BPF (中心周波数: $f_c=408$ MHz, BW=20 MHz), ⑤SDR 受信機 (Airsy mini).

している。

Google Map から福井工業大学の緯度と経度 (36.1°N, 136.2°E) を取得し, Python の天文データ解析パッケージである Astropy[8-10] を用いてパルサー B0329+54 の北中高度を計算した。福井工業大学での B0329+54 の北中高度は 71° であり, 3DCR の主ビームは各反射板に対し 45° 傾いた方向を向いているため, 3DCR は 26° 傾けて北向きに設置した (図6)。3DCR のビームサイズは約 25° と大きくポインティング精度への要求が厳しくないため, スマートフォンのコンパスと計測アプリでアンテナの方位角と仰角の位置合わせを行った。観測時間は先行事例 [1] と同じく 2 時間とした。感度計算や観測時間の設定については, 第 116 巻第 8 号の報告 [11] を参照されたい。

初観測は 1 月 31 日 (金) の夕方から開始した。Astropy と Python のタイマーモジュールを用いて B0329+54 北中時刻の 1 時間前から観測を開始し, 2 時間のデータを取得する観測プログラムを用いた。観測には gqrx[12] という SDR ソフトウェアを用い, SDR のサンプリング周波数 6 MHz で, 周波数帯域 413 ± 3 MHz の電圧データを単精度浮動小数点複素数によりハードディスクに保存した。記録された時系列データは高速フーリエ変換

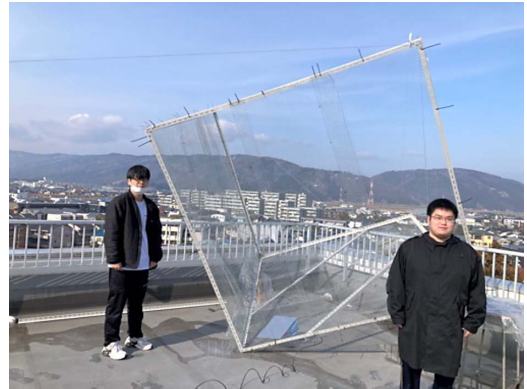


図6 完成した 3DCR の設置状況. 北に向けた 3DCR の仰角を B0329+54 の北中高度に固定している。

(FFT) により 1 ms ごとのパワースペクトルへと変換し, さらにソフトウェアパッケージ YOUR [13] を用いて PSRFITS 形式に変換した。その後, 国際的に広く用いられているソフトウェア PRESTO [14] を用いて, 群遅延補正 (De-dispersion) を実施した。ここで, De-dispersion とは, パルサーから放射された信号が星間空間を伝搬する過程で受ける遅延を補正する処理である。この遅延は, 周波数の逆数の二乗と, 星間プラズマ中の自由電子密度の視線方向積分値との積 (分散量: Dispersion Measure, DM) に比例する。今回の観測では B0329+54 に対して既知の DM 値である $26.7641 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ を採用した。De-dispersion 処理後, パルスの信号/雑音比を向上させるため信号を周期ごとに分割し畳み込む (Folding) 処理を行った結果, パルス信号が確認された。しかし, 観測地である福井市内は, RFI (電波干渉) の影響が大きかったため, PRESTO による RFI マスク処理を追加で実施した。その結果, 明瞭なパルス検出に成功し, 学生が自作した 3DCR を用いた都市部での観測としては, 本邦初の成果となった (図7, 8)。

観測は引き続き土日も継続し, RFI の状況がどのように変化するかを確認した。1 月 31 日 (金) は比較的 RFI が少なくパルサーを明確に検出することができたが, 2/1 (土) 及び 2/2 (日) には

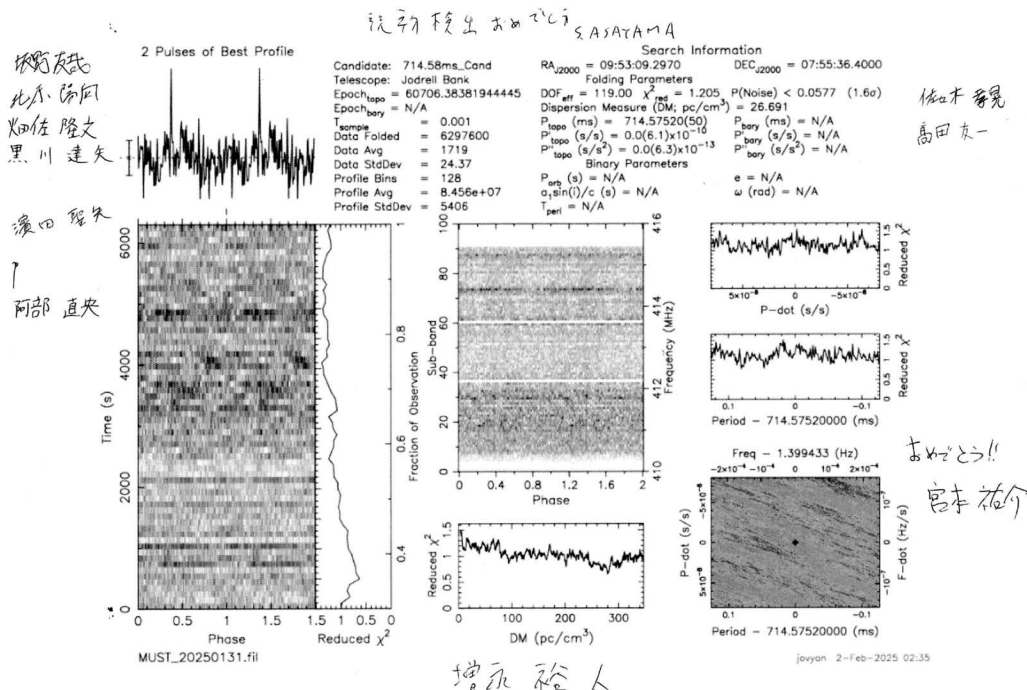


図7 福井工業大学での学生手作り3DCRによる電波パルサー（PSR B0329+54）初検出のプロット。



図8 作成した3DCRとの集合写真。

413.7 MHz付近に非常に強いRFI信号が混信しており、さらに410 MHz, また412 MHzにもRFIが見受けられた（図9）。非常に強いRFIのために2/2（日）のデータではパルサーの検出が明瞭にできなかった。総務省の周波数の割り当て [3] によると413.7 MHzは小電力無線電話に割り当てられているため、福井工業大学近辺で土日に無線電話を使った業者か個人がいたことが推測される。また410 MHzや412 MHzも固定陸上移動

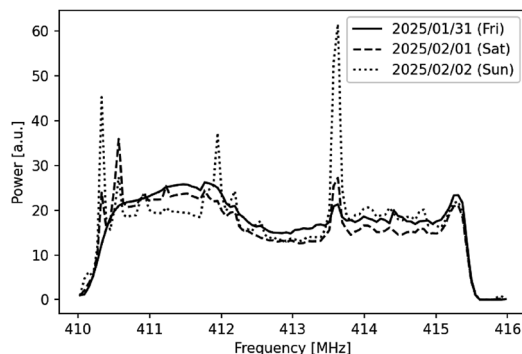


図9 2025年1/31（金），2/1（土）及び2/3（日）における2時間の平均パワースペクトル。

（公共業務用／一般業務用）で貨客運送事業用等に割り当てられているので、休日における人々の移動に伴うRFIが増えたものと考えられる。都市部での電波天体観測においては人間活動に起因するRFIをなくすことは不可能なので、人の活動が静まる深夜から早朝に天体が正中する季節での観測を行うなど、運用での対応が現実的であろう。

4. おわりに

今回実施した、手作り望遠鏡でのパルサー検出例は、望遠鏡製作に学生が主体的に関わることで、電波天文学をより深く理解するだけでなく、データ処理・解析といった面で新たなアルゴリズムを開発するためのプラットフォームとして活用できるポテンシャルを有している。また、アンテナ工学から観測天文学の多岐にわたる範囲をカバーしており、Pythonを用いたデータ解析やデータの視覚化、さらにAIを用いたRFI除去処理などの題材としての応用も考えられる。簡易で安価な装置を用いて市街地にある大学構内でパルサーの検出に成功した本結果は、国内の大学等における学生実験やデータ解析実習の課題としても活用できるであろう。

謝 辞

400 MHz帯の電波利用状況についての情報提供をいただいた日本流星研究会の矢口徳之氏および横川英彰氏に感謝申し上げます。本活動はJSPS科研費24K21474の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- [1] 矢口徳之他, 2024, 天文月報, 117, 109
- [2] 平松正顕, 2025, 天文月報, 118, 177
- [3] 総務省電波利用ポータル, <https://www.tele.soumu.go.jp/search/wari/index.htm>(2025.2.23)
- [4] Inagaki, N., 1974, IEEE Trans. Antenna. Propagat., 22, 580
- [5] <https://www.rf-world.jp/bn/RFW39/RFW39O.arc/www.e-em.co.jp/OpenMOM/index.html>(2025.2.23)
- [6] <https://nanovna.com/>(2025.2.23)
- [7] <https://airspy.com/airspy-mini/>(2025.2.23)
- [8] Astropy Collaboration, et al., 2013, A&A, 558, A33
- [9] Astropy Collaboration, et al., 2018, AJ, 156, 123
- [10] Astropy Collaboration, et al., 2022, ApJ, 935, 167
- [11] 矢口徳之他, 2023, 天文月報, 116, 426
- [12] <https://gqrx.dk/>(2025.2.23)
- [13] Aggarwal, K., et al., 2020, Journal of Open Source Software, 5, 2750
- [14] Ransom, S., 2011, Astroph. Sour. Code Lib. ascl:1107.017

Successful Detection of a Radio Pulsar (PSR B0329+54) in the 413 MHz Band Using a 3D Corner Reflector Antenna Made by Students at Fukui University of Technology

Yusuke MIYAMOTO¹, Nao ABE¹, Hinata KITAHARA¹, Tatsuya KUROKAWA¹, Tomoya SAKANO¹, Takaaki SASAKI¹, Yuuichi TAKADA¹, Seiya HAMADA¹, Takafumi HATASAKI¹, Yuto MASUNAGA¹, Tomoka TOSAKI² and Shin'ichiro ASAYAMA³

¹Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Fukui University of Technology, 3-6-1 Gakuen, Fukui, Fukui 910-8505, Japan

²Department of Geoscience, Joetsu University of Education, Yamayashiki-machi, Joetsu, Niigata 943-8512, Japan

³SKA Observatory (SKAO), Jodrell Bank, Lower Withington, Macclesfield, SK11 9FT, UK

Abstract: We report the successful detection of a radio pulsar (PSR B0329+54) in the 413 MHz band using a 3D corner reflector antenna made by students at Fukui University of Technology. This pulsar detection is not only the first detection of a pulsar by a student's handmade telescope in Japan but also the first demonstration of pulsar detection in a Japanese urban area with significant Radio Frequency Interference (RFI). The results show that pulsar observations can be carried out even with a simple and inexpensive telescope using only commercially available components purchased through the Internet. These findings will be useful for student experiments and data analysis training at universities and other institutions in Japan.