

# 福島県立白河旭高校での 手作り電波望遠鏡を用いた中性水素 21 cm 輝線の全天観測と電波地図作成



根本

根本 靖彦<sup>1</sup>・蓮見 咲弥<sup>1</sup>・橋本 真実<sup>1</sup>・  
菅野 晃生<sup>1</sup>・菊地 佑真<sup>1</sup>・小林 優斗<sup>1</sup>・  
塚田 涼雅<sup>1</sup>・百瀬 宗武<sup>2,3</sup>・浅山 信一郎<sup>4</sup>

〈<sup>1</sup> 福島県立白河旭高等学校 〒961-0914 福島県白河市旭町 1-3〉

〈<sup>2</sup> 茨城大学基礎自然科学野 〒310-8512 茨城県水戸市文京 2-1-1〉

〈<sup>3</sup> 国立天文台チリ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈<sup>4</sup> SKA Observatory, Jodrell Bank, Lower Withington, Macclesfield, SK11 9FT, UK〉

e-mail: <sup>1</sup>nemoto.yasuhiko@fcs.ed.jp

福島県立白河旭高等学校において、有志の生徒が自作した低コスト3Dコーナリフレクタ(3DCR)アンテナを用い、電波天文学者の遠隔指導のもと中性水素21 cm輝線の全天観測を実施し、全天電波地図の作成に成功した。さらに21 cm輝線のドップラーシフトを解析することで天の川銀河の回転構造を捉え、国際的なサーベイとの整合性も確認された。これらの成果は、教育現場における電波天文学実習の有効性と可能性を示すものであり、今後の科学教育への応用に向けた重要な一例となる。

## 1. はじめに

近年電波天文学は大型観測施設を中心とした国際共同研究が進展する一方で、身近な材料や安価な電子機器を用いた観測手法の可能性も示されつつある。情報通信技術の発展により高性能化したソフトウェア無線(SDR)や低雑音増幅器(LNA)などのアマチュア無線技術を活用することで、自作の電波望遠鏡による中性水素21 cm輝線の観測環境が整いつつあることが報告されている [1, 2]。しかしながら、高校生が電波天文学を実体験する機会は依然として限られており、教育現場における実践的な電波天文学体験の普及が求められている。

こうした背景のもと、福島県立白河旭高等学校において、有志の生徒が夏季課題として「自作3Dコーナリフレクタ(3DCR)アンテナを用いた天の川銀河の中性水素21 cm輝線の観測と全天電波地図の作成」に取り組んだ。本報告では、生徒が自作した3DCRアンテナを用いて中性水素21 cm輝線の観測を実施し、電波天文学者による遠隔指導のもとで得られたデータを解析し、全天電波地図を作成した結果を報告する。

## 2. 3DCRアンテナおよび観測装置

3DCRアンテナは、三枚の直交する反射板とモノポールアンテナから構成されており、金網など入手容易な材料で製作可能である [3]。本アンテ

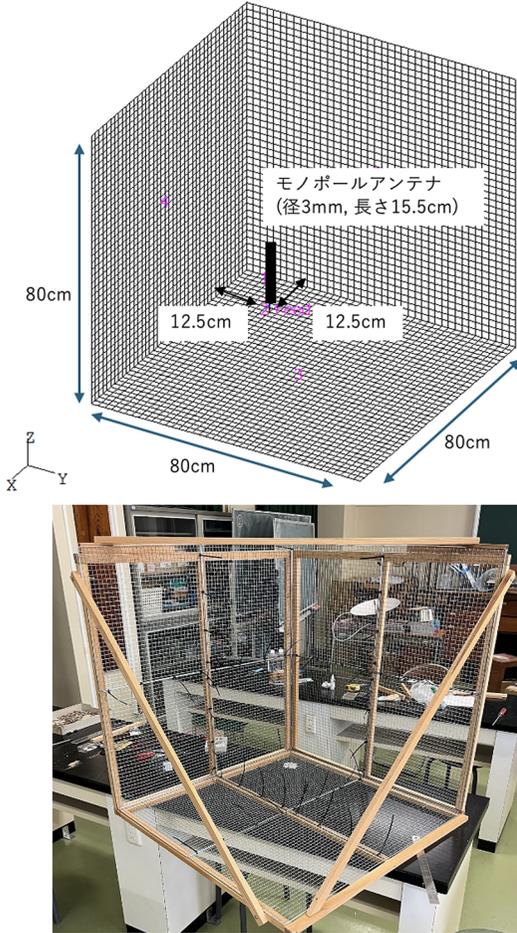


図1 (上) 3DCRの3次元モデル。3 mm径で長さ15.5 cmのモノポールを、反射面から12.5 cmの位置に配置している。(下) 作成した3DCR。

ナを用いた電波天体観測の事例も、これまでに複数報告されている [4, 5]。3DCRアンテナの金属反射面は、観測波長の約3倍のサイズが必要とされる。今回の観測対象である中性水素21 cm輝線に対しては、一辺60 cm以上の金属面が望ましい。そこで容易に入手可能な40 cm角の焼き網(100円ショップ製)を4枚連結し、約80 cm四方の反射面を構成した。焼き網は木製の枠に取り付け、結束バンドを用いて固定することで構造的な安定性と反射面の平坦性を確保した。図1に作成した3DCRアンテナの写真を示す。モノポール

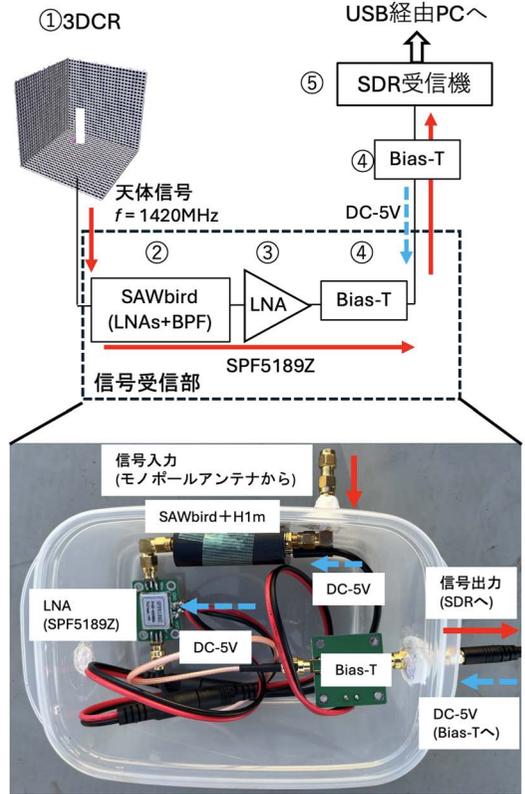


図2 (上) 観測システムのブロック図。①3DCRアンテナ、②NooElec SAWbird+H1m、③LNA (SPF5189Z)、④Bias-T、⑤SDR受信機 (NES-DR SMArt v5)。(下) 信号受信部の写真。NooElec SAWbird+H1 m, LNAおよびBias-Tによって構成されている。

アンテナには、長さ約15.5 cmの真鍮製ロッドを使用した。アンテナは反射面から約12.5 cm離れた位置に配置している。

図2には観測システムのブロック図を示している。信号受信部には、市販の中性水素21 cm輝線検出用モジュールNooElec SAWbird+H1m [6]と、LNAとしてSPF5189Zを用いた。SAWbirdは2つのLNAとBand Pass Filter (BPF) からなるモジュールである。SAWbirdとSPF5189Zへの電源供給はBias-Tを介して同軸ケーブルにDC-5Vを重畳することで行っている。システムの感度劣化を避けるためには、アンテナ入力から

信号受信までの信号損失はできる限り小さくする必要があるので、信号受信部をモノポールアンテナ直下に設置した。防水のために電子機器は食品保管用の密閉容器内に納めている（図2下図）。アンテナで受信された天体信号はSMA同軸ケーブル（長さ20 m）を用いて白河旭高校屋上から観測PCの設置場所まで引き込んでいる。

データ取得にはSDR（NESDR SMarT v5 [7]）とWindowsノートPCを使用した。SDRは2.4 MHzでサンプリングし、中心周波数～1420 MHzの複素電圧データをUSB経由でPCに保存している。PC上においてPythonのNumPyパッケージのfftモジュールを使用し、FFT（高速フーリエ変換）を実行してパワースペクトルを生成している。

### 3. 観 測

図3に、3DCRアンテナを白河旭高校屋上に設置した様子を示す。自作3DCRアンテナが電波望遠鏡としての機能を有するかを検証するため、まず太陽を対象としたドリフトスキャン観測を実施した。観測日は2025年8月31日であり、太陽の南中時刻（11時45分）を中心とした前後4時間の時間帯において、太陽が3DCRアンテナのビームパターンを横断する際の受信出力の変化をモニタリングした。3DCRアンテナのビームは各反射面に対して45度の角度で形成されるため、

観測日における太陽の南中高度（約62°）に対応するよう、アンテナ底面を17°上方に傾斜させて設置した。得られたデータにより、自作した3DCRアンテナが太陽からの連続的な電波放射を受信可能であることを確認した。これを受け、目的とする中性水素21 cm輝線の全天観測へと移行した。

天体は日周運動により天の北極を中心に東から西へ1日1回転する。この性質を活用することで、固定観測点においても時間軸に沿って広範な天空領域を取得することが可能となる。南北方向に3DCRアンテナの仰角を15°刻みで日々変更し24時間連続の定点観測を行った。受信データは10分間隔で取得している。図4には白河旭高校屋上から取得された、銀河座標系における観測天空領域を示す。Google Mapから白河旭高校の緯度と経度（37.1°N, 140.2°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]のcoordinatesモジュールを用いて観測時刻における方位角（Az）と仰角（El）を銀河座標系 [11]の銀緯（*b*）と銀経（*l*）に変換している。

アンテナを天体に向けると、天体信号に加えて大気や装置由来の雑音も受信される。電波望遠鏡観測では、これらを除去するためにポジションスイッチ法 [12] と周波数スイッチ法 [13] が広く用いられる。ポジションスイッチ法では、アンテナを動かして目的天体の方向（ON点）とそこから少し離れた天体からの信号がアンテナのビームに入らない方向（OFF点）を交互に観測する。ON点の信号からOFF点の信号を差し引くことで天体由来の信号のみを抽出することが可能となる。しかし天の川銀河に分布する中性水素ガスは天球面上に広く広がっており、ON点に近いOFF点を設定することが困難であること、また我々の3DCRアンテナは駆動機構を使用せず手でアンテナの向きを調整しているため、24時間にわたるポジションスイッチ観測を行うことは不可能である。そこで今回は、周波数スイッチ法を採用し



図3（左）生徒たちによる3DCRアンテナ設置の様子。（右）太陽の南中時刻を利用し日時計の原理に基づいて南北方向を確認。屋上に南北基準線をマーキングしアンテナの方向合わせの基準とした。

た。周波数スイッチ法ではアンテナの向きを変えずにON点のみを観測し、観測中に周波数をわずかに変化させた2種類のスペクトルを比較することで天体由来の成分を抽出する。実際の観

測では、観測中心周波数に対して±0.6 MHzずつ周波数を変化させ、それぞれの周波数で1秒間の観測を16セット実施した。

天の川銀河における中性水素原子ガスの視線速度を求めるにあたっては、局所静止基準 (Local Standard of Rest: LSR) に対する観測者の速度を補正する必要がある。本報告では観測者速度の計算に西村淳氏が公開しているAstroPyを用いた計算コード [14] を用いた。

#### 4. 観測結果

得られた観測データの解析は、Leiden/Argentine/Bonn HI Survey (以下LABサーベイ) との比較により行った [15]。LABサーベイはLeiden/Dwingeloo SurveyおよびInstituto Argentino de Radioastronomía Surveyを統合したものであり、全天にわたる中性水素21 cm輝線の観測データを

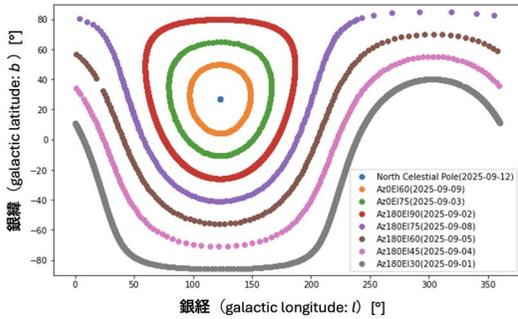


図4 白河旭高校屋上における観測天空領域 (銀河座標系)。仰角を15°刻みで変化させ、日ごとの24時間観測によりデータを取得した。天の北極 (North Celestial Pole) は不動のため観測点は固定された一点のみである。

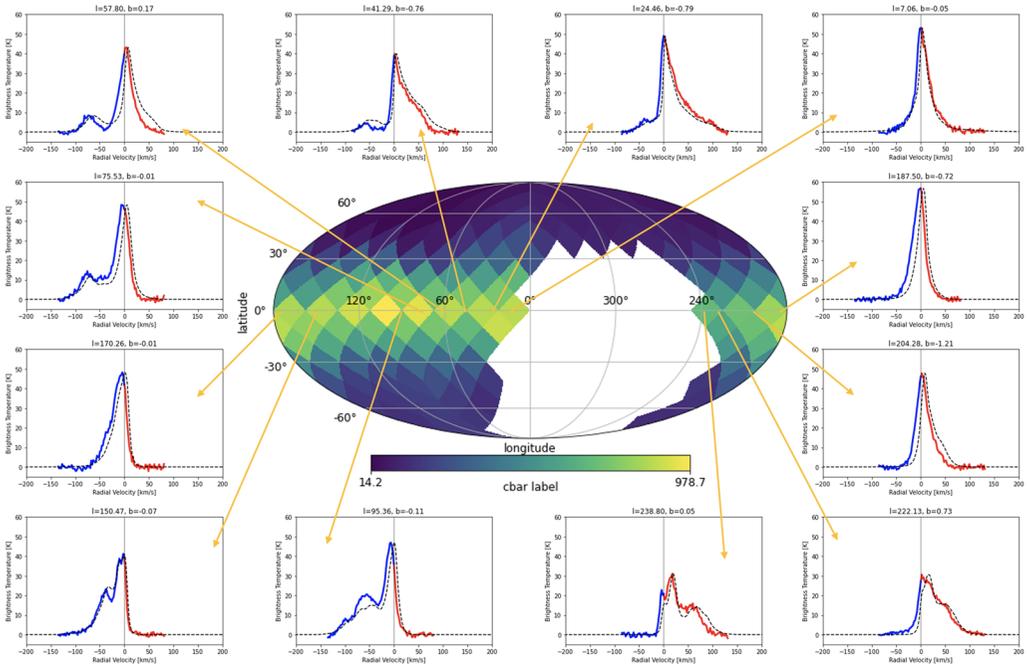


図5 自作3DCRアンテナを用いて白河旭高校屋上で行った全天観測によって得られた電波地図と、銀河面 ( $b \sim 0^\circ$ ) における各銀経方向の中性水素21 cm輝線のプロファイル。破線はLABサーベイのデータを示している。観測データをLABサーベイデータの輝度温度 (brightness temperature) に基づいてスケールし強度校正を行っている。

収録したアーカイブである。3DCRアンテナのビームサイズは円対称ではないものの平均して約25°程度である。このためLABサーベイとの比較解析に際しては、同等のビームサイズに平滑化されたデータをWebインターフェース [16] から取得し解析に用いた。観測データをLABサーベイデータの輝度温度 (brightness temperature) に基づいてスケージングし強度校正を行っている。

図5に白河旭高校屋上において取得された21 cm輝線の速度方向への積分値による全天電波地図 (中央) と、銀河面 (銀緯  $b \sim 0^\circ$ ) における観測結果として取得された、各銀経方向における中性水素21 cm輝線のプロファイルを示す。取得した全天データを適切に可視化するために、HEALPix投影法 [17] を用いて全天の電波地図を作成した。HEALPixは分割された各画素の面積が等しいという特性を持ち、全球データを均等に扱うのに適した手法である。

白河旭高校にて取得されたデータを用いて作成した電波地図は、天の川銀河の銀河面に沿って電波強度が増加する傾向を示しており、過去の電波地図と整合的な結果が得られた。一方で、LABサーベイに基づくプロファイルとの間には若干の差異が認められる。この理由としては、3DCRアンテナのビームサイズが円対称でないことに加え、赤道儀などの精密なアンテナ位置合わせ機材を使用せず、日時計によって求めた南北基準線 (図3右図) とスマートフォンのコンパスや水準器を用いて手動でアンテナの方向調整を行っているため、3DCRアンテナのビーム方向と意図した観測方向との間にずれが生じている可能性が挙げられる。

図5に示された中性水素21 cm輝線プロファイルでは、視線速度がマイナスの領域が青方偏移を示し、この方向に位置する銀河内の中性水素ガスの大部分が太陽系方向へ運動していることが示唆される。一方、視線速度がプラスの領域は赤方偏移を示し、中性水素ガスが太陽系から遠ざかって

いることを示している。図5のプロファイルは銀河中心に対して対称的な傾向を示しており、天の川銀河の回転運動を反映していると考えられる。これらの結果は、生徒が手作りした電波望遠鏡を用いて、天の川銀河の回転を観測的に検証できたことを示している。

## 5. おわりに

福島県立白河旭高等学校の有志の生徒により自作した3DCRアンテナを用いて中性水素21 cm輝線の検出を行い、白河旭高校から観測可能な全天領域に対する電波地図の作成にも成功した。得られた21 cm輝線のプロファイルはLABサーベイの結果と良好に一致しており、観測データの信頼性が確認された。またプロファイルの速度分布に見られる対称性は、天の川銀河の回転構造を示すものであり、自作装置による観測を通じてその実証が可能であることを示した。一方で本報告における観測は手動によるアンテナ方向調整に依存しており、観測方向の精度に関して課題が残された。赤道儀等の導入も検討されるが、高校生の活動という枠組みにおいては、生徒の主体的な取り組みを促すためにも敷居を低く保ちつつ、限られた活動費の中で自作にこだわり創意工夫を重ねることが重要であると考えている。

簡易かつ安価な装置を用いて中性水素21 cm輝



図6 3DCRアンテナとの集合写真.

線の全天電波地図を作成した本成果は、国内の高等学校等教育現場における電波天文学実習の有効性と可能性を示すものであり、今後の教育的展開に向けた貴重な一例となるだろう。

## 謝 辞

本活動にあたり予算面でのご支援ならびに貴重なご助言を賜りました、上越教育大学学校教育研究科（研究院）濤崎智佳教授に心より感謝申し上げます。本活動は日本学術振興会科学研究費補助金（課題番号：24K21474）の助成を受けて実施されたものです。

## 参考文献

- [1] 谷敷怜空, 2024, 天文月報, 117, 315
- [2] 谷敷怜空他, 2025, 天文月報, 118, 53
- [3] Inagaki, N., 1974, IEEE Trans. Antennas Propagat., 22, 580
- [4] 矢口徳之他, 2024, 天文月報, 117, 109
- [5] 宮本祐介他, 2025, 天文月報, 118, 558
- [6] <https://www.nooelec.com/datasheets/100811>
- [7] <https://www.nooelec.com/store/sdr/sdr-receivers/nesdr-smart-sdr.html>
- [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] <https://astro-dic.jp/galactic-coordinates/>
- [12] <https://astro-dic.jp/position-switching/>
- [13] <https://astro-dic.jp/frequency-switching/>
- [14] <https://qiita.com/nishimuraatsushi/items/9c8885daaf710b036f43> (2025.09.10)
- [15] Kalberla, P. M., et al., 2005, A & A, 440, 775
- [16] <https://www.astro.uni-bonn.de/hisurvey/euhou/LABprofile/index.php>
- [17] Gorski, K. M., et al., 2005, ApJ, 622, 759

## All-Sky Observation of the 21 cm HI Line Using a Student-Built Radio Telescope at Shirakawa Asahi High School

Yasuhiko NEMOTO<sup>1</sup>, Saya HASUMI<sup>1</sup>,  
Mami HASHIMOTO<sup>1</sup>, Kosei KANNO<sup>1</sup>,  
Yuma KIKUCHI<sup>1</sup>, Yuto KOBAYASHI<sup>1</sup>,  
Rima TUKADA<sup>1</sup>, Munetake MOMOSE<sup>2,3</sup> and  
Shin'ichiro ASAYAMA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Shirakawa Asahi High School, 1-3 Asahi-machi, Shirakawa, Fukushima 961-0914, Japan

<sup>2</sup>College of Science, Ibaraki University, 2-1-1 Bunkyo, Mito, Ibaraki 310-8512, Japan

<sup>3</sup>National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

<sup>4</sup>SKA Observatory (SKAO), Jodrell Bank, Lower Withington, Macclesfield, SK11 9FT, UK

Abstract: Students at Shirakawa Asahi High School in Fukushima Prefecture conducted observations of the 21 cm emission line of neutral hydrogen using a hand-made 3D corner reflector antenna. With remote guidance from radio astronomers, they successfully produced an all-sky radio map. Analysis of the Doppler-shifted 21 cm signal revealed the rotational structure of the Milky Way Galaxy, and the results showed good agreement with previous survey data. These findings highlight the educational value and effectiveness of hands-on radio astronomy activities in school settings, particularly within STEM (Science, technology, engineering, and mathematics) education.