

# 高銀緯で発見された正体不明の電波バースト

新 沼 浩太郎

〈国立天文台水沢 VLBI 観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kotaro.niinuma@nao.ac.jp



突如として明るく輝く天体現象や不定期にバーストを起こすような天体をトランジェント天体という。このトランジェント天体は電波、可視光、X線、 $\gamma$ 線と、さまざまな電磁波で発見されている。早稲田大学の大師堂研究室では電波領域におけるトランジェント天体（電波トランジェント）の発見を目指して独自に電波望遠鏡を開発し（早稲田大学那須パルサー観測所）、周波数 1.4 GHz 帯でのサーベイ観測を継続的に行ってきた。その結果、筆者らはこの観測装置を用いて電波トランジェントの検出に成功した。本稿では発見された電波トランジェントについて、早稲田大学那須パルサー観測所の紹介も交えて報告する。

## 1. はじめに

この広い宇宙において、いつ、どこで起こるか分からない突発的な天体現象をとらえるためには 1) 一度に広範囲を観測できる望遠鏡の開発、2) 定常的、継続的な観測が不可欠である。

現在高エネルギートランジェント現象として最も注目を集めているガンマ線バーストは電波の領域にまで及ぶ残光が観測されるとともに、その残光観測によって、非常に大きい赤方偏移が確認されるなど宇宙論的な距離でも起こる現象としてその検出や起源の理論モデル構築に力が注がれている。そのため宇宙空間に打ち上げられた高エネルギー天文衛星での検出から地上における多波長でのフォローアップ観測に至るまで非常に大規模な体制も整っている。

一方、電波領域における従来のトランジェント現象や変動電波源のモニターの例としては、白鳥座 X-3 などの電波バーストのモニターや、80 年代にアメリカ電波天文台 (NRAO) の Green Bank Telescope を用いて行われた銀河面における変動電波源・トランジェント電波源のモニター観測、

最近では銀河中心方向のトランジェント電波源のモニター観測などがある。しかし突発現象の再発性がわかっている天体や比較的領域の絞りやすい銀河中心方向などを除くと、定常的なモニター観測・サーベイ観測は行われてこなかった。その理由として電波望遠鏡で集光力や分解能を上げるためには、必然的に非常に口径の大きい鏡面が必要になり、その莫大な開発・運営コストから小規模な研究機関が 1), 2) を満たすために専用の大規模な観測装置を所持することは困難だと考えられていたからである。

### 1.1 早稲田大学那須パルサー観測所

早稲田大学は電波トランジェント・変動電波源・パルサーのサーベイを目的として、1998 年暮れに栃木県黒磯市（現在は那須塩原市）の自由学園那須農場の敷地の一角を借りて那須パルサー観測所の建設を開始した（図 1）。直径 20 m の大型電波望遠鏡を数多く作るため、建設コストをできるだけ抑えるようアンテナのデザインはすべて研究室内で行い、建設も安く請け負ってくれる町工場に依頼した。観測周波数を 1.4 GHz 帯（帯域は 20 MHz）に絞り、鏡面もパラボラではなく球面鏡

を採用した\*1。

球面鏡は焦点をもたないが、第2反射鏡（副鏡）を上手く設計することで焦点を作ることができる（図2）。そして大型の主鏡を固定にし、副鏡を方位角方向に動かし観測方向を変えることのできる設計にしたことで、同程度の集光面積をもつ通常の駆動型電波望遠鏡の数十から数百分の1のコストで建設することができた。

目的を絞りを、なくても目的達成にそれほど影響を与えない機能を省くことで、小規模な研究機関

でも大型観測装置を建設することが可能であるということを実証した\*4。

## 1.2 定常的な観測に至るまで

とはいえ、私立大学の一研究室である。格安で大型の電波望遠鏡を建設できるようになったとはいえ予算には限りがあるので、少しずつの増設となっていくのは仕方がない\*2。筆者が研究室に入った2002年には電波望遠鏡は5台のみで（それでも直径20mの電波望遠鏡5台が立ち並ぶ景色はたいへん見応えがあった）、試験観測と並行し、ハード・ソフト両方を自ら作ってはデバッグ\*3、直してはデバッグ…を繰り返している段階だった。今思えば、この段階で研究室に入れたことは、機器のはんだ付けやプログラミング、観測装置・測定装置の扱いに慣れることができたという点で非常に貴重な経験であったと思う。

余談ではあるが研究室における筆者の最初の大仕事は、地中1.5mの深さに埋めてあるケーブルの束の掘り起こし（というよりは掘り探し）と、掘り起こした長さ100mのケーブルの束が増設された電波望遠鏡3台に問題なく使用できるかの確認作業であった\*4。

2004年春には8台の望遠鏡すべてを用い、電波トランジェントを発見するためのサーベイ観測を



図1 30m電波望遠鏡の上から見た真冬の那須パルサー観測所の様子。2基のアンテナの周りに網が張られているのは大地からの熱雑音などが入り込んでくるのを防ぐためである。他のアンテナにも順次張っていく予定。

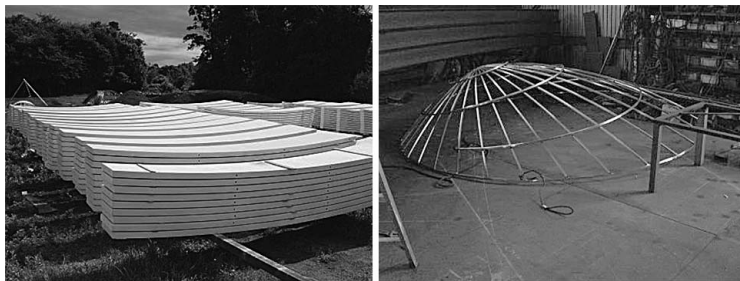


図2 積み上げられた球面鏡の鏡面パネル（左）と研究室で設計した副鏡の骨組み（右）。

\*1 3点ローラーに板を流し込むと一定曲率の金属板が簡単にできてしまう。簡単に作れる＝安く作れる！

\*2 第1列目の20m鏡8台は2003年初旬に完成。2009年現在、第2列目の1台目として30m鏡も稼働している。

\*3 開発したハードウェアやソフトウェアが問題なく動作するか、問題がある場合はどこに原因があるのかなどを調べる作業。

\*4 ケーブルだけは最初から電波望遠鏡8台分用意してあったのだが、使用しない分は紫外線などにさらされ劣化しないように残りの電波望遠鏡の完成まで地中に埋めてあった。

開始することができた。また、同年夏には、定常観測と並行し望遠鏡 8 台分の受信機利得補正システムの開発・設置および性能評価を行い<sup>5)</sup>、高感度観測に向けた準備も整った。

## 2. 電波トランジェント探しの開始

那須パルサー観測所の観測領域は赤緯+32度から+42度の範囲である。筆者らはまず 8 台の電波望遠鏡を同じ基線長で 4 組の 2 素子干渉計に分け、それぞれの干渉計が異なる赤緯を観測することでできるだけ広い空をサーベイする方法を選んだ。地球の自転を利用した完全待ち受け観測であるため、1日のうちで同じ天体、同じ領域を観測できる時間は望遠鏡の視野(約 0.8 度)を空が横切る 4 分弱だけだが、赤経方向には 24 時間分限なくサーベイすることが可能である\*<sup>5)</sup>。観測可能な赤緯の幅約 10 度を 0.5 度ずつ刻んで 21 の帯に分割し、各干渉計に担当赤緯を割り振ることで一度に四つの赤緯幅をカバーする。ひと月の間各干渉計の観測方向を固定し観測、向きを変えてまたひと月観測…という風に半年程度かけて観測可能な領域全てをサーベイすることを目指し、定常観測を開始した。

2004 年 5 月に電波トランジェント発見のための定常的なサーベイ観測を開始して以来、同年 12 月には観測領域の 2 セット目のサーベイ観測が始まった。定常観測が軌道に乗り始めたものの、新たな問題が浮かび上がってきた。解析が追いつかないのである。とりあえず定常的な観測を始めた一心得でハード・ソフトの開発・デバッグを頑張ってきたのだが、日々大量に出てくる観測データの解析手法にまで気が回っていなかったのである。加えて、当時研究室で観測、装置メンテナンス、解析のためにいつでも動ける状態の人間は

筆者を含めて 3 人程度であったため、今あるデータを解析しきれずに翌日には新しい観測データが出てくるといった状態に陥っていた。

この状況を解決するため観測データの中から自動的に、天体からの信号かただの雑音かを識別し、天体(候補)の信号情報のみを抜き出してくれるソフトウェアが開発された<sup>6),7)</sup>。最終的には実際に「目視」でデータの確認を行うのだが、一次処理としてこのソフトウェアを用いるようになったことで解析効率が格段に向上した。実際にこのソフトウェアを用いることで膨大なデータの中からいくつもの電波トランジェントを発見することが可能になったのである。

## 3. 電波トランジェント

### 3.1 電波トランジェントの発見

記念すべき初めての電波トランジェントは日本時間 2004 年 5 月 21 日午前 1 時 59 分に赤経=17 h37m02s、赤緯=38°08' の位置で検出され、WJN J1737+3808\*<sup>6)</sup>と名づけられた<sup>8)</sup>(図 3)。その強度は約 1.6 Jy\*<sup>7)</sup>と那須の電波望遠鏡が検出できる感度の 5 倍を超えるものであった。2 章でも述べたが、このサーベイ観測では 1 日当たり 4 分しか同じ天体・領域を観測することができず、次に観測できるのは翌日(約 23 時間 56 分後)である。5 月 21 日に検出されたこの天体は、前日の 5 月 20 日(24 時間前)、翌日の 5 月 22 日(24 時間後)には検出できていない。つまりこの電波トランジェントが輝いていた時間は 4 分以上、約 48 時間未満と見積もることができる。また、驚くことにこの天体は筆者らが電波トランジェントのサーベイ観測を開始してからわずか 5 日後に検出されているのだ。解析の遅れからこの天体の発見は 2005 年半ばになってしまったが、定常的に繰り返しサー

\*<sup>5)</sup> “赤経”と“赤緯”は天体の位置を示す座標。

\*<sup>6)</sup> 天文学では天体の名前を検出した位置で呼ぶことが多い。“WJN”とは「早稲田」、「自由学園」、「那須」それぞれの頭文字に由来する。

\*<sup>7)</sup> 天体の強度を表す単位で「ジャンスキー」と読む： $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$

B1633+3814

WJN J1737+3808

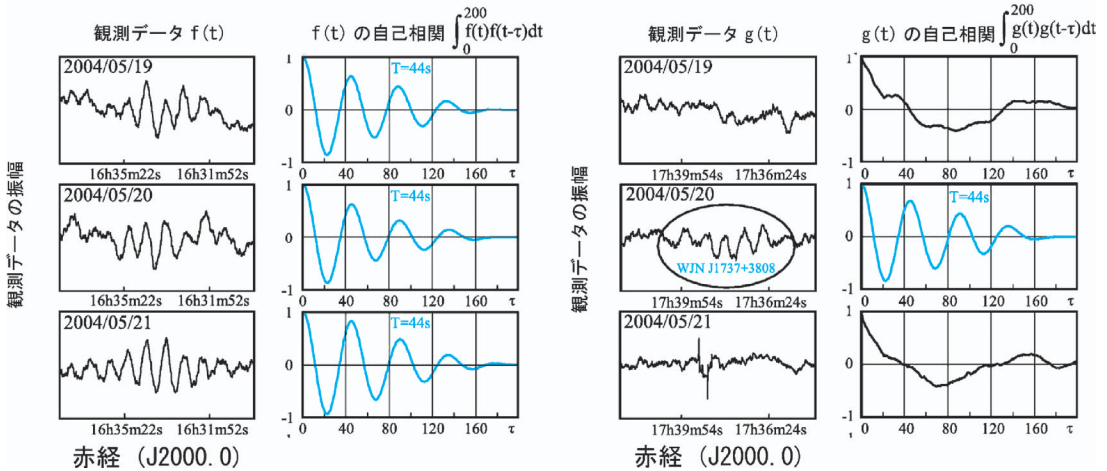


図3 定常的に明るい天体 (B1633+3814) と WJN J1737+3808 の観測されたフリンジ。観測開始から5日後に雑音レベルの5倍を超える強度で検出された (Kuniyoshi, et al., 2007 より)。

電波トランジェントWJN J1443+3439の光度曲線

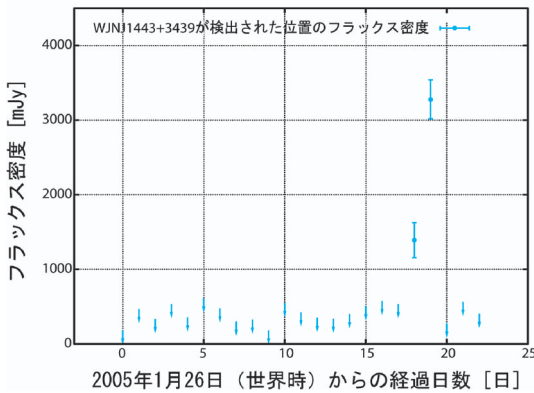


図4 WJN J1443+3439 の光度曲線。唯一2日間観測された電波トランジェント。検出できなかった日は雑音レベルの2倍を上限値として示している。

ベイすれば、同様の電波トランジェントがいくつも見つかることを予感させる結果だった。実際にこれ以降、安定して観測を続けられているときは年数個の割合で電波トランジェントが発見されていった。

那須パルサー観測所で検出された電波トランジェントの数は2007年末時点で約15天体であったが、ほとんどがWJN J1737+3808と同様1日

のみの検出で再現性がなかった。そんななか、筆者が解析を行い検出したWJN J1443+3439<sup>9)</sup>という天体のみ唯一2日続けて検出され(図4)、この天体の検出によって電波トランジェントが、最低数時間から数十時間は輝いている可能性が出てきた。

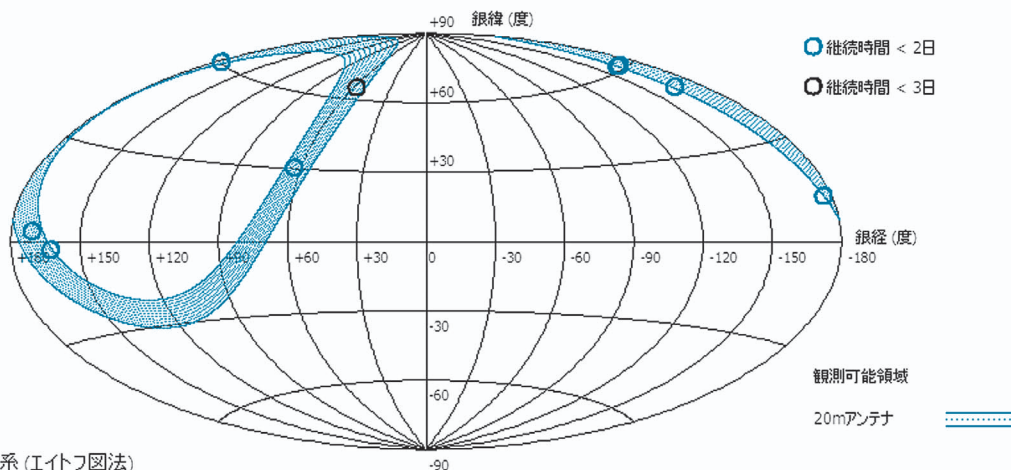
また統計的な解析の試みとしてlog N-log Sプロットも調べられた。その結果、電波トランジェントの検出数はまだ非常に少ないながら、現時点で一樣等方的な分布を示唆する結果が得られ<sup>10)</sup>、銀河座標上での分布も銀河面などに集中することなく低銀緯、高銀緯に散らばっている様子が伺えた<sup>11)</sup>(図5)。

3.2 世界中で見つかり始めた電波トランジェント

電波トランジェントのサーベイ自体は早稲田大学が始める前から他の観測機関でも行われていた。しかし、そのほとんどが銀河面のみサーベイであったり、銀河中心領域に絞ったモニター観測であったりと、バイアスのかかった観測ばかりであった。一方、早稲田大学の電波トランジェントサーベイの観測領域は観測装置の設計上、全天



銀河座標上で電波トランジェントが検出された位置



銀河座標系 (エイトフ図法)

図5 銀河座標上での電波トランジェントの検出位置. 網掛けの領域が直径 20m 電波望遠鏡での観測可能な領域. 黒い丸が2日続けて検出された電波トランジェント WJN J1443+3439 の位置.

の7%であるとはいえその領域内を無バイアスで観測することが可能である。銀河面だけでなく、高銀緯も同様に「繰り返し」サーベイしてきたことが図5の分布を示すような電波トランジェントの発見につながったと思われる。

近年、早稲田大学以外からも電波トランジェントの検出報告がされている。2006年、2007年にはアーカイブデータの再解析により発見された複数の電波トランジェントが報告された。オーストラリアのパークス観測所で行われているパルサーサーベイのアーカイブデータからは再現性のあるパルサーに似た性質の電波トランジェント<sup>12)</sup>と、5ミリ秒という非常に短い継続時間ながら30 Jyの強度で、かつ系外に起源をもつバースト<sup>13)</sup>が発見された。NRAOのVLAを用いた観測のアーカイブデータの再解析からもいくつもの電波トランジェントが高銀緯で発見された<sup>14), 15)</sup>。

#### 4. 電波トランジェントの正体は？

那須パルサー観測所で発見された電波トランジェントは現時点ではまだ「正体不明」の天体である。早稲田大学の電波トランジェントサーベイ

はできるだけ広い範囲を同時にモニターすること（広域サーベイ）に重点をおいて行っているため、角度分解能（赤経方向10'程度、赤緯方向50'程度）は良くない。この視野の中には候補になりうる電波源、銀河・クエーサーが10個程度は含まれてしまい、数Jyという明るさのバーストの起源に対応する天体を突き止められていないのである。現時点でこの「正体不明」の天体についてわかっている情報は、①高銀緯でも低銀緯でも観測される、②バーストの継続時間が数十時間以内、の二つだけである。

まず高銀緯で観測されたということは、銀河系内の太陽系近傍（数百pc以内）での現象であるか、あるいは非常に遠方の系外起源である可能性が考えられる。近傍におけるトランジェント現象としては閃光星（赤色矮星や褐色矮星）によるフレアがよく知られている。しかし、これらのフレアはGHz帯での強度が電波トランジェントに比べ10分の1以下と弱く（褐色矮星のフレアに至っては数mJy程度<sup>16), 17)</sup>、起源の候補としては考えにくい。系外に目を向けると、中心に巨大質量ブラックホールを携えた活動銀河中心核

(AGNs) が電波領域でも強度変動を示すことがよく知られており、電波トランジェントの対応天体候補である。

低銀緯では系内の X 線連星が電波で数 Jy のフレアをすることが知られている。特に白鳥座 X-3 は数 GHz 帯でまれに 10 Jy 程度の非常に大規模なフレアを起こし、減光するまでに数日かかる<sup>18)</sup>。電波トランジェントの強度や継続時間のスケールを見る限り、低銀緯で見ついているものに関しては X 線連星のフレアをとらえている可能性も十分ありうる。

ただ、現時点では対応天体を特定することができないというだけでなく、これら電波トランジェントすべてが同じ起源に由来する現象なのかさえわかっていない。そのため電波トランジェントの候補となりうる天体(現象)が複数存在し、また未知の天体現象であるという可能性も否定できない。

## 5. 今後に向けて

できるだけ早く電波トランジェントの起源を突き止めたい。それには

1. 対応天体の同定(対応する天体があるのかないのか)
2. スペクトル情報

が必要だろう。広域サーベイで検出した電波トランジェントが消えてしまう前に、早稲田大学大師堂研究室が現在デバッグを行っている空間 FFT 干渉計でのマルチビーム観測<sup>19)</sup>や、他周波での追観測で継続時間やスペクトルについての情報を取得し、超長基線干渉計(VLBI)や可視光望遠鏡などで対応天体を特定することを目指す<sup>20)</sup>。

幸いにも、この電波トランジェントについては国内でも興味をもってくださる方々がいる。「どういった天体かわからないのだからとりあえず追

観測してみよう」というような言葉もいただいた。不運も重なり 2009 年度初旬まで定常的な観測運用が難しい状況だったが<sup>\*8)</sup>、2009 年夏頃から定常観測が再開された。電波トランジェント検出時に外部へ発信できるシステムの再構築を急ぎたい。

## 謝 辞

本稿で紹介した内容は、筆者の博士論文の内容と早稲田大学で研究を行ってきたうえでの経験を基にしたものです。大師堂経明氏(早稲田大学)には筆者が博士論文という形で研究成果をまとめるまで、7 年間にわたり指導していただきました。遊馬邦之氏(鳩ヶ谷高校)、竹内 央氏(JAXA)、国吉雅也氏(マックス・プランク研究所)、松村寛夫氏(三菱電機)、岳藤一宏氏(情報通信研究機構)には早稲田大学大師堂研究室に在籍していた当初より、非常に多くの助言をいただきました。また、観測所立ち上げ前から大師堂研究室に所属し、観測所立ち上げにご尽力された諸先輩方のおかげで本研究を行うことができました。ほかにも研究生を送るうえでとても多くの方にお世話になりました。皆様にこの場をお借りし心より御礼申し上げます、ありがとうございました。本研究は文部科学省科学研究費補助金(若手 B, 20740110)と文部科学省科学研究費補助金(基盤研究 A, 14204027)のサポートを受けています。

\*8) 2008 年秋、那須パルサー観測所を大規模な落雷が襲い、観測システムだけでなく、通信回線などのインフラも大打撃を受けた。少しずつ復旧を進め、2009 年夏前くらいから定常運用を再開できている。

参考文献

- 1) Daishido T., et al., 1996, Proc. ASPC 105, 19; Pulsars: problems and progress, Johnston S., Walker M. A., Bailes M. (Eds.)
- 2) Daishido T., et al., 2000, Proc. SPIE 4015, 73; Radio Telescopes, Butcher H. R. (Ed.)
- 3) Ichikawa H., et al., 2004, Proc. Universal Academy Press, Inc., 6th RESCEU “Frontier in Astroparticle Physics and Cosmology,” 391, Sato K., Nagataki S. (Eds.)
- 4) Takeuchi H., et al., 2005, PASJ 57, 815
- 5) Niinuma K., et al., 2007, PASP 119, 112
- 6) Kuniyoshi M., et al., 2006, PASP 118, 901
- 7) Takefuji K., et al., 2007, PASP 119, 1145
- 8) Kuniyoshi M., et al., 2007, PASP 119, 122
- 9) Niinuma K., et al., 2007, ApJ 657, L37
- 10) Kida S., et al., 2008, New Astronomy 13, 519
- 11) Niinuma K., et al., 2009, ApJ 704, 652
- 12) McLaughlin M. A., et al., 2006, Nature 439, 817
- 13) Lorimer D. R., et al., 2007, Science 318, 777
- 14) Gal-Yam A., et al., 2006, ApJ 639, 331
- 15) Bower G. C., et al., 2007, ApJ 666, 346
- 16) Lang K. R., et al., 1983, ApJ 272, L15

- 17) Berger, E., et al., 2001, Nature 410, 338
- 18) Marsh K. A., et al., 1974, ApJ 192, 697
- 19) Nakajima J., et al., 1993, PASJ 45, 477
- 20) 新沼浩太郎, 2009, JVN Reports, 2(1), 5

**Unidentified Radio Bursts at a High Galactic Latitude**

**Kotaro NIINUMA**

*Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, Osawa 2-21-1, Mitaka, Tokyo 185-8588, Japan*

Abstract: Transient phenomena are discovered at several wavelengths. In order to search for these transient phenomena in the radio band, called radio transients, we have been carrying out wide-field and repeating survey at 1.4 GHz at the Waseda Nasu Pulsar Observatory. As the result of this survey project, we succeeded to discover several radio transients at high and low galactic latitude.