

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01116

研究課題名(和文) VERA用FRB探査相乗り観測システムの開発とそれに基づく突発天体の研究

研究課題名(英文) Development of commensal FRB search engine for VERA and observational studies of transient sources

研究代表者

本間 希樹 (Honma, Mareki)

国立天文台・水沢VLBI観測所・教授

研究者番号：20332166

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,660,000円

研究成果の概要(和文)：Fast Radio Burst (FRB) はミリ秒程度の電波パルスが観測される謎の電波天文現象であり、その観測的研究のため本計画では国内の電波望遠鏡用の観測システムとデータ解析ソフトの開発を進め、それらを用いてFRBの電波観測を実施した。3天体の再帰型FRBでバーストの探査を実施したところ、FRB 20201124Aの電波バーストの検出に成功した。これは国内の電波望遠鏡による初のFRB検出である。また、検出されたバーストは、非再帰型/再帰型FRBの平均光度の差から両者を違う種族とするこれまでの結果に一石を投じたものとなっており、今後のさらなる追観測の重要性を改めて示すものとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Fast Radio Burst (FRB) と呼ばれる正体不明の電波バースト現象の観測研究のため、国内の電波望遠鏡でその信号を検出するシステムと解析ソフトを開発した。それに基づいて3天体の再帰型FRBの観測を行ったところ、1天体で電波バーストを検出することに成功した。これは、日本の電波望遠鏡を用いたものとして初めての検出であり、日本におけるFRBの観測研究の幕開けとなるマイルストーンとなった。

研究成果の概要(英文)：Fast Radio Burst (FRB) is a mysterious radio-astronomical phenomenon in which a radio pulse of about ~ 1 millisecond is observed at GHz band. We have developed a backend system for FRB observations as well as software for its data analysis and have carried out FRB observations using radio telescopes in Japan. Observations were conducted mainly on three repeating FRBs, and one of them, FRB 20201124A (repeating FRB at $z = 0.098$), has been successfully detected. This is the first FRB detection by a radio telescope in Japan. In addition, the detected burst exhibited substantial difference from the previous suggestion, in which non-repeating FRBs are significantly brighter than repeating FRBs and thus they are different populations. Our FRB detection emphasizes the importance of further follow-up observations for revealing the nature of FRBs.

研究分野：電波天文学

キーワード：時間領域天文学 突発天体 高速電波バースト(FRB) パルサー VLBI

1. 研究開始当初の背景

Fast Radio Burst (FRB) とは、ミリ秒程度の電波パルスが単発で到来する謎の電波天文現象である。FRB では、主に GHz 帯で観測される電波の遅延時間に大きな周波数分散が確認されることから、系外銀河でおきる電波帯の突発現象であると考えられている。しかし、本研究提案時には、FRB のバースト信号を直接用いて天体位置を高精度で検出した例は皆無であった。そのため観測ネットワークの拡充によるバースト信号の検出と位置決め、そしてその位置情報に基づいた多波長フォローアップ観測が FRB の正体解明に向けて重要であると考えられていた。

このような中、日本に存在する電波望遠鏡を用いた FRB 観測を可能にすべく、国立天文台の VERA 望遠鏡向けの FRB 観測システムを開発し、それを用いて VERA 等の日本の電波望遠鏡を用いて FRB の検出を目指すとともに、FRB と関連する現象である可能性があると考えられるマグネターのフレアや若いパルサーから Giant Radio Pulse に関する観測的研究を進めることを目指して本計画は立案された。

なお、本研究の開始後に本格運用が始まった海外の CHIME 望遠鏡や ASKAP 望遠鏡により、複数の repeating FRB が検出され、またバースト信号を用いた位置同定観測が世界的に大きく進展しており、それに合わせて本研究も repeating FRB の検出とその理解に重きを置いた研究へと徐々にシフトしながら研究を進めた。

2. 研究の目的

FRB からのバースト電波を VERA などの日本の電波望遠鏡を用いて観測してその正体にせまることを目的として、本研究計画では以下の3つの主要課題を設定している。

(1) FRB 観測のためのデジタルバックエンドおよび解析ソフトの開発

VERA 等の電波望遠鏡に高速サンプラーとデジタルバックエンドを設置して、他の観測と平行記録が可能な広帯域の FRB 観測システムを開発することを最初のステップとする。この観測システムには、サンプラーや記録装置に加えて、記録後の後処理で FRB 信号を探索する解析ソフトも含む。

(2) FRB 観測システムの評価

上記(1)で開発する広帯域デジタルバックエンドや観測データの解析ソフトを、実際の観測データを用いて正しく動作することを確認する。検証には、VERA などの国内の電波望遠鏡を用い、カニパルサーの Giant Radio Pulse など、FRB に類似しているがより検出頻度の高い電波パルスのデータを用いる。

(3) FRB の検出とそれに基づく研究の展開

VERA やその他の国内の電波望遠鏡を用いて FRB の観測を実施し、(1)(2)で開発・評価が完了した広帯域デジタルバックエンドやデータ解析ソフトを用いて、日本の電波望遠鏡を用いた FRB の検出を目指すとともに、実観測データに基づく FRB 研究を展開することを最終的なゴールとして設定した。また、これに併せて、FRB と関連する現象と考えられるマグネターや若いパルサーの Giant Radio Pulse の観測的研究の推進も目指す。

3. 研究の方法

(1) デジタルバックエンドおよび解析ソフト開発

今回の科研費により、広帯域サンプラー ADS-3000 と、そのデジタルデータを記録する広帯域記録システム (VSREC) を VERA の水沢局へ導入した。このシステムの導入により最大 8 Gbps の記録レートでの観測と記録が可能となった。また、解析ソフトウェアについては、高速フーリエ変換と分散量度 (Dispersion Measure=DM) 補正を組み合わせたダイナミックスペクトルの作成ツールや、DM 補正済みの時系列パルスデータを作成するソフトを開発した。解析ソフトについては当初は通常の CPU 処理としたが、広帯域データの処理のために高速化が必要となり、GPU を用いた高速処理ソフトの開発も進めた。

(2) 実観測データの取得による評価

(1) で開発したシステムを VERA に搭載して実際のデータ取得を行った。また、得られたデータを開発したソフトウェアで処理して、どれくらいの速度が達成できるかを評価した。特に GPU を用いた高速化もテストし、実時間に対する処理速度比を測定してどこまで準リアルタイム

処理に近づけられるかを評価した。解析ソフトの評価用データの取得のため、VERA やその他の電波望遠鏡でかに星雲に位置するかにパルサー等の電波バーストを観測した。

(3) FRB および関連天体の実観測の実施

VERA を始めとする国内の電波望遠鏡を用いて、FRB を探査するための科学観測を実施した。具体的には、バースト電波の再検出の可能性が高いターゲットとして、次の3つの repeating FRB 天体を対象とした。

- a) FRB 20200120E (母天体が近傍銀河 M81 の球状星団である repeating FRB)
- b) FRB 20200428 (銀河系内マグネターの FRB)
- c) FRB 20201124A (z=0.098 にある銀河が母天体の repeating FRB)

これらの観測に使用した望遠鏡は、VERA の 20m 電波望遠鏡、臼田 64m 鏡、山口・茨城 32m 鏡などである。また FRB との関連が示唆されている類似性のある電波バースト現象として、銀河系内で 2018 年に発生した XTE J1810-197 のマグネターフレアの観測や、カニパルサーの Giant Radio Pulse の電波観測なども行っている。FRB も含め、これらの観測における主な周波数帯は、2GHz、6.7GHz、8GHz、22GHz であり、FRB やパルサーの主たる観測周波数である 2GHz 帯に加えて、比較的高い周波数の観測も並行して実施した点が従来の研究にない特徴となっている。

4. 研究成果

3の(1)(2)で述べた装置およびソフト開発と試験評価については、主に VERA 望遠鏡を用いて動作試験を完了して科学観測の実施までを達成している。高速サンプラーおよび広帯域デジタルバックエンドによるデータ取得に成功し、さらに VERA による 2GHz 帯のカニパルサーの Giant Radio Pulse の検出など、電波パルスの検出が実際に可能であることが実証されている。また、データ解析の高速化のため GPU を用いたスペクトル解析や DM 補正、パルス探査ルーチンを開発し、その性能評価も行った。その結果、32MHz 幅程度の狭帯域観測データであればリアルタイム処理が可能となる計算速度が得られている一方で、2Gbps を超える広帯域処理では、まださらなる高速化が必要であることが分かった。しかし、複数のマシンを用いるなど計算資源の増強により、観測データを一定程度定期的に処理することのできるシステムを構築することができた。

このようなシステムの完成を受けて、repeating FRB のフォローアップ観測を VERA や臼田、山口・茨城等の国内の電波望遠鏡を動員して複数回実施した。ターゲットとしては銀河系内または比較的近傍の銀河にあって明るいバーストの検出が見込まれる3天体を選び、かつ ATEL (Astronomer's telegram) の最新情報に基づいて天体の活動性の高い時期を狙って観測を実施した。その結果、FRB 20200120E および FRB 20200428 についてはいずれの望遠鏡・周波数でも未検出であったが、FRB 20201124A については臼田 64m 望遠鏡による 2 GHz 帯の観測で、FRB のバースト信号を検出することに成功した(図1)。さらに観測データから DM を推定したところ、 $DM=412 \pm 3 \text{ pc cm}^{-3}$ と以前の測定結果と一致し、この信号が FRB からのものであることを確認することができた。この検出は、日本の電波望遠鏡による初の FRB 検出であり、この分野での日本の観測研究の幕開けを告げるものとなった。

同 FRB の臼田の観測では 8GHz 帯でも同時に観測されたが非検出だったことから、スペクトル指数に制限が付けられた。また、2GHz の fluence の値が求まったことから、これまでに検出されているその他の FRB と fluence の比較が可能となった。これまでの研究では、repeating FRB と non-repeating FRB では fluence に系統的な差があり、両者が違う種族の天体現象であるこ

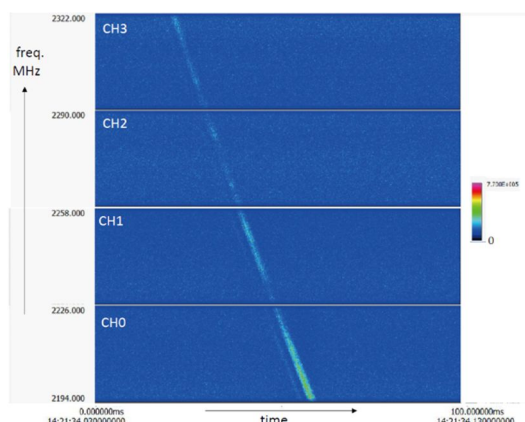


図1：臼田 64m電波望遠鏡で得られた FRB 20201124A の電波バースト。横軸が時間(100 ミリ秒)で、縦軸が周波数(2194~2322 MHz)。DM による遅延補正前の生データなので、遅延の分散性が顕著である。

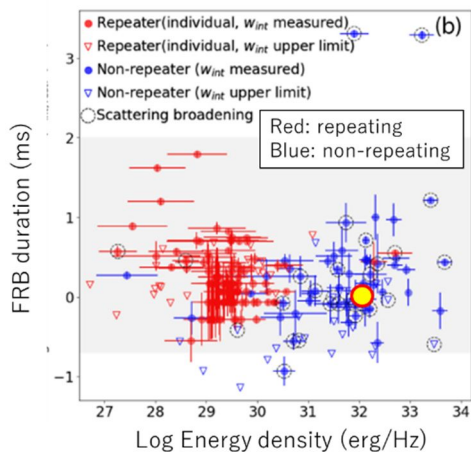


図 2 : 臼田 64m 電波望遠鏡で観測された FRB 20201124A の電波バーストと他の FRB イベントのエネルギー分布 (横軸)。これまでの観測では Non-repeating FRB の方がエネルギーの値が高い。しかし、我々が検出したイベントは repeating FRB ながら、non-repeater 相当の強度を持つことがわかり、この 2 つの種族の理解に一石を投じている。Hashimoto+ (2020) を元に作成。

とが示唆されていたが、今回観測された FRB は repeating FRB でありながらも、non-repeating と同程度の fluence を有することが明らかになった (図 2)。従って今回の観測は「二種類の FRB は本当に違う種族なのか？」という命題に疑問を投げかけるものとなり、今後同様な追観測を行ってさらに統計を増やすことの重要性を改めて指摘する結果となった。この結果は、ATEL にて検出の暫定報告 (AteI #15285) がなされた他、現在英文査読論文としてまとめられつつあり、本研究終了後に速やかに投稿される見込みである。

あわせて、これらのパルス解析の過程で、明るい電波バーストを VLBI のサンプラーのような 2 ビットの量子化で観測すると、デジタル化損失による振幅低下が顕著に発生し、正しい天体強度が得られないことが判明した。この現象は古くから指摘されていたものの、これまでの研究では具体的な対処がされてこなかった。今回我々は、強いパルスを入力した場合のシミュレーションに基づいてデジタル化損失の度合いを推定し、それを補正する手法も考案して解析ソフトウェアに実装している。

さらに、FRB に関連すると考えられる天文現象の研究も進められ、マグネター J1810-197 のフレアの観測では多周波同時受信 (2GHz, 8GHz, 22GHz) に成功して、スペクトルやパルス周期の変動率などに制限をつけることに成功した (Eie+ 2021)。また、カニパルサーの Giant Radio Pulse 観測においては、X 線強度との相関関係が初めて示されるなど (Enoto et al. 2021) FRB に留まらず電波パルスを放射する天体の観測敵研究でも、本研究計画で培った経験が活用されて新たな成果の算出につながった。

これらの研究にあたっては、当初予定していた共同研究者に加えて、大学院生や PD などの若手研究者の貢献があった。彼らの本研究における活動は、データ解析プログラミングのスキル向上や科学研究面の広がりにも繋がっており、関連分野の若手研究者の育成面においても本計画が貢献できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Enoto T. et al, including Honma M.	4. 巻 372
2. 論文標題 Enhanced x-ray emission coinciding with giant radio pulses from the Crab Pulsar	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 187--190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abd4659	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Eie S. et al., including Honma M.	4. 巻 73
2. 論文標題 Multi-frequency radio observations of the radio-loud magnetar XTE J1810-197	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publication of Astronomy Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1563-1574
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab098	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Bolli P., Orfei A., Zanichelli A., Prestage R., Tingay S. J., Beltran M., Burgay M., Contavalle C., Honma M. et al.	4. 巻 131
2. 論文標題 An International Survey of Front-end Receivers and Observing Performance of Telescopes for Radio Astronomy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of the Pacific	6. 最初と最後の頁 085002.1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1538-3873/ab1f7e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Yamasaki S., Kisaka S., Terasawa T., Enoto T.	4. 巻 483
2. 論文標題 Relativistic fireball reprise: radio suppression at the onset of short magnetar bursts	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4175-4186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3388	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hitomi Collaboration, 計203名 (T. Terasawa 194番目)	4. 巻 70
2. 論文標題 Hitomi X-ray studies of giant radio pulses from the Crab pulsar	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 15.1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx083	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ishizaki, W., Tanaka, S. J., Asano, K., Terasawa, T.	4. 巻 838
2. 論文標題 Broadband Photon Spectrum and its Radial Profile of Pulsar Wind Nebulae	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 142.1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa679b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 寺澤敏夫
2. 発表標題 Crabパルサー: 鹿島観測の10年を振り返って
3. 学会等名 第17回IVS技術開発センターシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久野晋之介 (含む、寺澤敏夫他)
2. 発表標題 The largest glitch in the Crab pulsar in 2017 November
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会 (熊本大)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 スジン・リー、寺澤敏夫、本間希樹、赤堀卓也、小山友明、榎戸輝揚、米倉覚則、関戸衛、岳藤一宏、三澤浩昭、土屋史紀、青木貴弘、木坂将大
2. 発表標題 Multi-frequency radio observations of a new outburst from the recently reactivated transient magnetar XTE J1810-197
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会（法政大）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木貴弘、新沼浩太郎、藤沢健太、元木業人、寺澤敏夫、岳藤一宏
2. 発表標題 山口32 m電波望遠鏡を用いたパルサー観測の定常化
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会（兵庫県立大学）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本間希樹
2. 発表標題 低周波高分解能電波観測の進展
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会シンポジウム「低周波電波観測が切り開く宇宙物理学」（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 寺澤敏夫
2. 発表標題 電波観測によるCrabパルサー磁気圏研究・FRBへの応用
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会シンポジウム「低周波電波観測が切り開く宇宙物理学」（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	池田 思朗 (Ikeda Shiro) (30336101)	統計数理研究所・数理・推論研究系・教授 (62603)	
研究 分担者	寺澤 敏夫 (Terasawa Toshio) (30134662)	国立研究開発法人理化学研究所・主任研究員研究室等・研究員 (82401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------