

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：62616

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24103003

研究課題名(和文)天体重力波の光学赤外線対応現象の探索

研究課題名(英文)Search for Optical Infrared Counterpart of Gravitational Wave Sources

研究代表者

吉田 道利(Yoshida, Michitoshi)

国立天文台・ハワイ観測所・教授

研究者番号：90270446

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 168,300,000円

研究成果の概要(和文)：重力波源の光赤外線対応現象の追跡観測のための観測ネットワークJ-GEMを構築し、人類初の重力波検出GW150914を始めとする5つの重力波アラートに対して、J-GEMによる光赤外線追跡観測を実施した。特に、史上初の中性子星合体からの重力波検出イベントGW170817に対しては、すばる望遠鏡、南アフリカIRSFなどを駆使した追跡観測により、光赤外線対応天体を検出する事に成功し、理論計算との比較から、中性子星合体によってrプロセス元素が合成されるという証拠を得た。また、J-GEMのために、超広視野CMOSカメラ、面分光装置、広視野赤外線カメラ、50cmロボット望遠鏡などの装置開発を進めた。

研究成果の概要(英文)：We constructed an observation network J-GEM for follow-up observation of gravity wave (GW) sources to detect optical-infrared counterpart of GW event. We carried out optical-infrared follow-up observations for five GW alerts including the first GW detection GW150914 using the J-GEM network. For the GW event GW170817, which was the first detection of GW from a binary neutron star merger, follow-up observations using the Subaru Telescope, South Africa IRSF and so on were performed. As a result, we succeeded in detecting the optical-infrared counterpart of the event. We compared the observation results with theoretical calculations in detail, and obtained evidence that huge amount of r-process elements was synthesized by the neutron star coalescence. For the J-GEM, we also developed observation instruments including an ultra wide field CMOS camera, an integral field spectroscopy system, a wide field infrared camera, and a 50 cm robot telescope.

研究分野：光学赤外線天文学

キーワード：光学赤外線天文学 電波天文学 重力波天体 突発天体 天文観測装置開発

## 1. 研究開始当初の背景

2015年に始まる本格的な重力波観測では、ブラックホール連星や中性子星連星の合体等の強い重力場での重力波放射現象をとらえる事ができると推測されていた。しかしながら、重力波観測は位置決定精度が極めて悪く、距離を正確に推定することができない。このため、重力波観測のみからその放射天体を特定することは非常に難しい。したがって、電磁波によるフォローアップ観測によって発生位置と距離を特定することが必要不可欠である。そのとき、光赤外線領域(波長370nm~2.5μm)は特に重要な役割を果たす。

光赤外線は、天文学における基本波長域である。光赤外線波長域は、恒星のエネルギー放射のピークにあたり、宇宙を構成する基本要素である恒星を調べるために最適の波長である。またこの波長域には原子・イオンからのさまざまな重要な吸収線および輝線放射が集中しており、天体の温度、密度や化学組成を詳細に調べることができる。吸収線・輝線を用いて天体までの精密な距離測定を行うこともできる。このため、様々な種類の天体現象が光赤外線の研究され、その性質が詳細に調べられている。したがって、重力波観測で検出された天体現象の光赤外線対応天体が検出されれば、その正体や物理機構の解明が一気に進むことが期待される。しかし、光赤外線は星間物質による減光を受けやすい。そこで、電波域でもフォローアップをすることが重要となる。また、光赤外線と電波の発生時間差や光度差などは、重力波発生源の構造を探る良い指標となる。

重力波現象の光赤外線・電波フォローアップ計画は、国外の重力波観測計画(LIGO、Virgo)でも整備されつつあった。こうした計画では、既存の地上望遠鏡に重力波アラートを伝達し、重力波発生予想天域を即時に観測するシステムを構築する予定であった。重力波は宇宙のどこでいつ発生するのかはまったく予測不可能なため、全地球的な電磁波フォローアップ観測網の整備が必要である。日本を中心とした極東地域は、この意味で非常に重要である。この地域に、日本がイニシアチブをとって重力波フォローアップ観測システムを整備することは、わが国の重力波観測プロジェクト KAGRA にとってのみならず、国際的にも意義深いものであった。

## 2. 研究の目的

重力波の放射源を特定し、その放射メカニズムに迫ることを目指し、突発激変天体の光赤外・電波観測ネットワークを構築する。重力波との同時検出および即時フォローアップ観測を行うために、光赤外広視野観測装置を中心とした装置開発を行い、計画研究 A04 と連携して重力波アラートに対応した即時観測システム構築を行う。これらをフルに活用し、計画研究 A1 と密接に連携して、重力波源として有力視されているガンマ線バ

ースト、超新星、中性子星などの電磁波による観測研究を推進する。また、計画研究 A3 による粒子観測とも連携したマルチメッセンジャー観測を実施し、重力波天体の多角的な理解を目指す。

本研究の具体的目標は、以下の3つにまとめられる。(1) 光赤外線広視野観測システムの構築: 木曾 1m シュミットカメラ用の超広視野 CMOS センサ型カメラ(超広視野 CMOS カメラ)の開発、岡山 91cm 広視野赤外線望遠鏡(OAOWFC)の自動化、京大 3.8m 望遠鏡に搭載する面分光器開発を中心に、超大量画像データから変動天体を自動的に検出・測光する解析パイプラインの開発を進める。(2) 光赤外線の全地球的観測網の整備: 中国西域部への 50cm 広視野ロボット望遠鏡(中国 50cm 望遠鏡)を設置し、木曾、岡山、広島などの国内観測所と東京大学・アタカマ望遠鏡(miniTAO)、名古屋大学・南アフリカ望遠鏡(IRSf)などを結んだ全地球的突発激変天体観測網を整備する。(3) 電波観測による激変天体のフォローアップ観測体制の整備: 野辺山観測所 45m 電波望遠鏡、山口大学 32m 電波望遠鏡などを用いた連携観測体制を整える。

## 3. 研究の方法

海外の重力波検出器から通知される重力波アラートに対応した光赤外線での即時観測システムを、各分担者がそれぞれの担当の望遠鏡・観測装置を順次開発・整備していくことで構築していく。並行して、既存のシステムを用いて突発天体観測を推進する。新規開発装置は順次、以下のネットワークに投入し、KAGRA の本格観測開始までに重力波アラートに対応した光赤外線・電波の観測網を完成させる。

そのために、木曾 1m シュミット望遠鏡の高精度化・高速化と、超広視野 CMOS センサ型カメラ(超広視野 CMOS カメラ)の開発、岡山 91cm 広視野赤外線望遠鏡(OAOWFC)の自動化、50cm 広視野ロボット望遠鏡(中国 50cm 望遠鏡)の海外設置と、それに搭載する広視野多色カメラの開発を行う。データ解析システム、データ保存システムも整備する。並行して電波観測と連携した突発天体観測ネットワークを整備する。

木曾シュミット望遠鏡の超広視野 CMOS カメラの開発と、中国 50cm 望遠鏡の設置を中心に、並行して突発天体の光赤外・電波観測ネットワークの整備を行う。開発・整備したシステムは順次観測に投入し、重力波源候補天体の観測的研究を推進する。

## 4. 研究成果

(1) 重力波源の光赤外線対応現象の追跡観測のために日本の望遠鏡群を集約した観測ネットワーク J-GEM (Japanese collaboration of Gravitational-wave Electro-Magnetic follow-up observation; 図

1) を構築し、米欧の重力波望遠鏡 LIGO、Virgo の国際共同研究チームとの間に、重力波追跡観測のための研究協定書 (MOU) を交わした。J-GEM には国立天文台をはじめ、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、鹿児島大学、兵庫県立大学などの大学が国内外に有する 10 台の望遠鏡が含まれる。

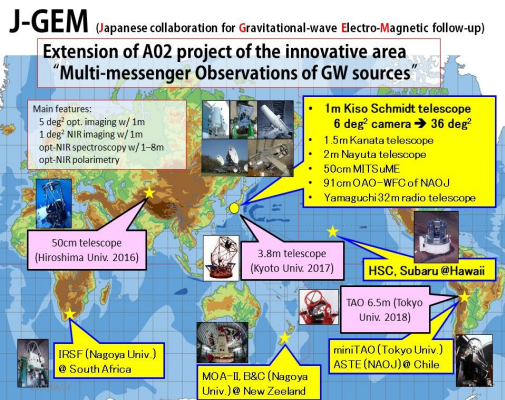


図 1 J-GEM の概要

(2) J-GEM を活用して、LIGO、Virgo による重力波観測で検出されたブラックホール連星合体の追跡観測を実施した。2015 年 9 月 14 日に LIGO によって検出された人類史上初の重力波源 GW150914 に対し、木曾観測所およびニュージーランドの Mt. John 観測所での追跡観測を行った。さらに、LIGO による 2 番目の重力波検出 GW151226 についても J-GEM によるフォローアップ観測を実施した (図 2)。いずれの観測でも重力波に対応する光赤外線現象の発見には至らなかったが、世界の追跡観測網の中で大きな寄与をすることができた。2016 年 11 月より開始された LIGO の第二回本格運用 (O2) においては、GW170104、GW170814 の 2 つのブラックホール連星合体からの重力波の追跡観測を行った。

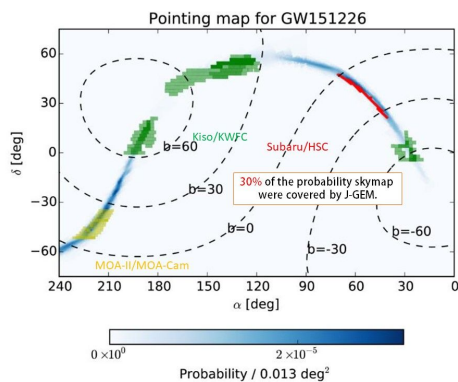


図 2 J-GEM による GW151226 の探査範囲

観測結果は、LIGO・Virgo の国際追跡観測ネットワークに報告し、GW150914、GW151226 の観測結果については 3 本の査読論文として発表した。

(3) 人類初の中性子星合体からの重力波検出イベント GW170817 に対し、光赤外線追跡観測を実施し、その対応天体を検出して 15 日間に渡って追跡観測をすることに成功した (図 3)。そして、その光度変化の様子を、独自に実施した中性子星合体からの放射の理論シミュレーション計算と詳細に比較した。その結果、中性子星合体からの高速放出物で、素早い中性子捕獲反応 (rapid neutron capture; r-プロセス) により大量の重元素が生成されたことが分かった (図 4)。その総量は地球質量の 1 万倍にも及び、その中にはこれまでその生成場所が不明であった金やプラチナなどの元素が含まれている可能性が極めて高い。

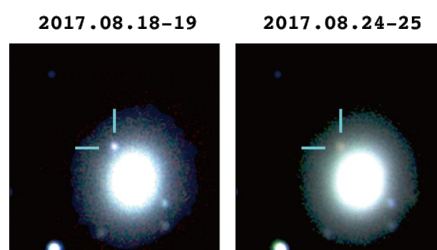


図 3 GW170817 の光学対応天体 (中央の星状光源) の発見

GW170817の光赤外線対応天体との比較

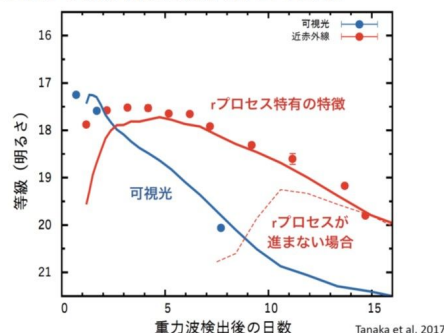


図 4 GW170817 の光赤外対応天体の光度曲線と理論予想比較。中性子星合体からの放出物質中で r プロセスが進んだという予測 (実線) と観測点 (青点、赤点) が良く一致している。

この観測は、重力波観測と電磁波観測が密接に協調することができた初めての例であり、宇宙の理解のための「マルチメッセンジャー観測 (重力波、電磁波、ニュートリノなど多様な観測手段を連携させて行う観測研究)」の本格的な幕開けとなった。我々の観測は、国際観測ネットワークの一員として行われ、ネットワーク全体のまとめ論文の他に、我々独自の結果をまとめた 3 本の査読論文として発表した。

(4) J-GEM に投入するための観測装置開発を進め、以下のような成果を得た。  
木曾 1m シュミット望遠鏡の駆動系の更新

を行い、望遠鏡駆動につき従来の3倍の高速化を実現した。超広視野 CMOS カメラ Tomo-e のプロトタイプ開発を行い、CMOS を8素子並べた試験カメラを製作して試験観測を行った。このプロトタイプ開発では、CMOS の駆動システム、データ解析システム、カメラの機械系や熱制御系を製作した。試験観測による性能評価によって、設計通りの性能を発揮することを確認した。この結果に基づき、64 個の CMOS 素子を搭載する完全仕様カメラの開発を開始した。

京都大学 3.8m 望遠鏡用に、光ファイバーを用いた面分光ユニットを開発した。開発した面分光ユニットは、岡山天体物理観測所 188cm 望遠鏡の観測装置 KOOLS に装着し、試験観測および共同利用観測を実施した。さらに、面分光ユニットを用いて突発天体に対応するための観測システムを開発した。188cm 望遠鏡を用いた試験観測では限界等級が 19 等級近くにまで到達することを実証した。また、GW150914 においてはフォローアップ観測を実施した。

広視野赤外線カメラ OAO-WFC は光学系の調整を行い、自動観測システムの開発と、データ解析パイプラインの開発を行った。2015 年より自動観測システムを用いた定常モニター観測を継続し、銀河面に多数の新たなセファイド変光星、ミラ型変光星を発見することに成功した。また、O2 における重力波イベントに対して赤外線広域探査を実施した。

広島大学は 50cm 広視野ロボット望遠鏡および可視光三色同時カメラを開発し、中国・チベットの標高 5000m の阿里サイトに設置した(図5)。その試験観測の結果、大気の透明度と安定度、夜の暗さなどの点において、チベットサイトが天文観測に極めて適していることを実証することに成功した。



図5 中国・チベット・阿里サイトに設置された 50cm 広視野ロボット望遠鏡

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 113 件)

Tominaga, N., Tanaka, M., Morokuma, T., Yoshida, M., Kawabata, K. S., Motohara,

K., Ohta, K., and 27 colleagues, Subaru Hyper Suprime-Cam Survey for an optical counterpart of GW170817, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70 巻, 2018, 28,  
DOI: 10.1093/pasj/psy007

Utsumi, Y., Tominaga, N., Tanaka, M., Yoshida, M., Kawabata, K. S., Motohara, K., Ohta, K., and 11 colleagues, A challenge to identify an optical counterpart of the gravitational wave event GW151226 with Hyper Suprime-Cam, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70 巻, 2018, 1,  
DOI: 10.1093/pasj/psx125

Tanaka, M., Utsumi, Y., Mazzali, P. A., Yoshida, M., Motohara, K., Ohta, K., Kawabata, K. S., Doi, M., Nagayama, T., and 36 colleagues, Kilonova from post-merger ejecta as an optical and near-Infrared counterpart of GW170817, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 69 巻, 2017, 102,  
DOI: 10.1093/pasj/psx121

Utsumi, Y., Tanaka, M., Tominaga, N., Yoshida, M., Nagayama, T., Kawabata, K. S., Motohara, K., Ohta, K., Doi, M., and 50 colleagues, J-GEM observations of an electromagnetic counterpart to the neutron star merger GW170817, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 69 巻, 2017, 101,  
DOI: 10.1093/pasj/psx118

Yoshida, M., Utsumi, Y., Tominaga, N., Ohta, K., Kawabata, K. S., Motohara, K., Nagayama, T., Yanagisawa, K., Doi, M., Fujisawa, K., and 28 colleagues, J-GEM follow-up observations of the gravitational wave source GW151226, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 69 巻, 2017, 9  
DOI: 10.1093/pasj/psw113

〔学会発表〕(計 59 件)

吉田道利, 「GW170817 とは何だったか」, 日本天文学会春季年会, 2018 年 3 月 16 日, 千葉大学

富永望, 吉田道利, 他, 「GW170817: する望遠鏡 HSC を用いた可視光対応天体の探索」, 日本天文学会春季年会, 2018 年 3

月 15 日、千葉大学  
内海洋輔、吉田道利、本原顕太郎、川端弘治、他、「GW170817：J-GEM による可視近赤外線追跡観測」、日本天文学会春季年会、2018 年 3 月 15 日、千葉大学

田中雅臣、吉田道利、他、「GW170817：光赤外線対応天体と r プロセス元素合成」、日本天文学会春季年会、2018 年 3 月 15 日、千葉大学

吉田道利、「J-GEM：天体重力波の電磁波追跡観測ネットワーク」、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 20 日、東北学院大学

〔図書〕(計 2 件)

岡村定矩、吉田道利 他、日本評論社、天文学辞典 シリーズ現代の天文学 別巻、2012 年、539

谷口義明、吉田道利 他、講談社、新・天文学事典、2013 年、768

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

・HinOTORI プロジェクト  
<http://hinotori.hiroshima-u.ac.jp/>

・新学術研究・計画研究 A02 「天体重力波の光学赤外線対応現象の探索」  
<http://jgem.hiroshima-u.ac.jp/>

・The Tomo-e Gozen project  
<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/tomoe/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 道利 (YOSHIDA, Michitoshi)  
国立天文台・ハワイ観測所・教授  
研究者番号：90270446

(2) 研究分担者

太田 耕司 (OHTA, Koji)  
京都大学・理学研究科・教授  
研究者番号：50221825

(3) 研究分担者

柳澤 顕史 (YANAGISAWA, Kenshi)  
国立天文台・岡山天体物理観測所・助教  
研究者番号：90311183

(4) 研究分担者

本原 顕太郎 (MOTOHARA, Kentarou)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号：90343102

(5) 連携研究者

土居 守 (DOI, Mamoru)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号：00242090

(6) 連携研究者

川端 弘治 (KAWABATA, Koji)  
広島大学・宇宙科学センター・教授  
研究者番号：60372702

(7) 連携研究者

永山 貴宏 (NAGAYAMA, Takahiro)  
鹿児島大学・理学研究科・准教授  
研究者番号：00533275

(8) 連携研究者

藤澤 健太 (FUJISAWA, Kenta)  
山口大学・時間学研究所・教授  
研究者番号：70311181