

Subaru/Hyper Suprime-Camを用いた 重力波可視光対応天体探査観測

富 永 望

〈甲南大学理工学部物理学科 〒658-8501 神戸市東灘区岡本 8-9-1〉

e-mail: tominaga@konan-u.ac.jp



Advanced LIGOによる第一期 (O1) 観測は、GW150914に続き2015年12月26日に2回目の重力波GW151226の直接検出を実現した。GW151226は、GW150914と異なり、北天の高確率領域の広い範囲が観測可能であった。そこで、われわれJ-GEMはすばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam (HSC)を用いた追観測を行った。本稿では、HSCによるGW151226追観測について、論文には載らないドタバタを紹介したい。私たちの苦労話と思って読んでいただければ幸いである。本観測の科学的成果については関連する論文^{1),2)}を参照していただきたい。

1. 観測準備

2015年10月8日、吉田道利さん（広島大学）から「重力波追跡観測グループへの参加」という表題のメールが届いた。Advanced LIGO/Advanced Virgoによって検出される重力波のフォローアップを主目的とした望遠鏡ネットワーク「J-GEM」³⁾に参加して欲しい、というメールであった。当時、(私はこの時点では知らなかったが)GW150914がすでに発見され、吉田さんを筆頭研究者とするすばる望遠鏡を用いたTarget-of-Opportunity (ToO) 追観測の期間が始まっていた。

すばる望遠鏡は、2014年3月より本格的な観測を開始したHyper Suprime-Cam (HSC)⁴⁾という8mクラス望遠鏡唯一の広視野撮像カメラをもつ。私は、それまでHSCを用いた高頻度超新星探査観測を主導しており、ハワイ観測所における即時データ解析システムの構築、およびこのシステムを用いた即時天体検出とその速報に成功していた⁵⁾。そのため、白羽の矢が立ったのであろう。ちなみに、このシステムは、諸隈智貴さん（東京大学）、田中雅臣さん（国立天文台）と東京大学

木曾シュミット望遠鏡Kiso Wide-Field Camera (KWFC)⁶⁾を用いて行った超新星探査観測Kiso Supernova Survey (KISS)⁷⁾のシステムを元として、安田直樹さん（東京大学/Kavli IPMU）、古澤久徳さん（国立天文台）、ハワイ観測所のKiaina Schubertさんや能丸淳一さんの助けを借りながら開発したものである。

HSCによって得られる膨大な観測データを扱うには観測前の準備が極めて重要である。重力波に対応した可視光天体の追観測はこれまで行ってきた超新星探査観測と根本的に異なる。それは、重力波の位置決定精度の悪さに起因する観測領域の広さである。そのようなデータを解析するためにはどうすればよいのか、安田さん、古澤さん、内海洋輔さん（広島大学）と相談しながら、システムの改修およびテスト解析を進めていた。

それ以外にも、どのように位置較正、等級較正を行うかという課題もあった。というのは、HSCデータ解析パイプラインは基本的にはSloan Digital Sky Survey (SDSS)⁸⁾のカタログを使って位置較正や等級較正を行っている。しかし、SDSSの観測領域は全天を覆っているわけではな

く、SDSS領域外で重力波が検出されることも容易に想像できた。そのため、その対応方策についても相談を進めていた。

このように様々な準備を進めながら、新たな重力波検出のそのときを待った。

2. GW151226検出とHSC観測一日目

年越しも差し迫った2015年12月28日午前1時半（日本時間）に重力波検出の報が届いた。当時KOOLS-IFU⁹⁾の観測で国立天文台岡山観測所にいた松林和也さん（京都大学）がすぐさま反応し、内海さんが重力波到来方向にある近傍銀河のカタログを作成した。それを受けて、伊藤亮介さん（広島大学 [当時]）らによる広島大学かなた望遠鏡を用いた観測など、その夜のうちにJ-GEMによる追観測が開始された¹⁰⁾。

では、すばる望遠鏡はどうだったのだろうか？ 残念なことに、GW151226の起こった2015年12月26日はほぼ満月であり、すばる望遠鏡にHSCが搭載されるのは発生から11日後の2016年1月5日、ToO観測を申請できるのは13日後の2016年1月7日であった*1。そして、GW151226の高確率領域は銀河面を横切っており、危惧していたとおりSDSS領域にはほとんど含まれていなかった。

HSCが使用可能になるまでに他の望遠鏡によって良い候補天体が発見されれば他の装置による観測の可能性も考慮していたが、intermediate Palomar Transient Factory (iPTF) などによる変動天体検出の報告¹¹⁾はあるもののGemini望遠鏡などを用いた天体同定¹²⁾が進み、HSC搭載の日を迎えた。その時点でGW151226の発生から時間は経過していたが、われわれは、HSCであれば他の望遠鏡に比べても十分深い観測が可能であり、特に重力波可視光対応天体検出に重要なzバンドでの観測が報告されていなかったため、科

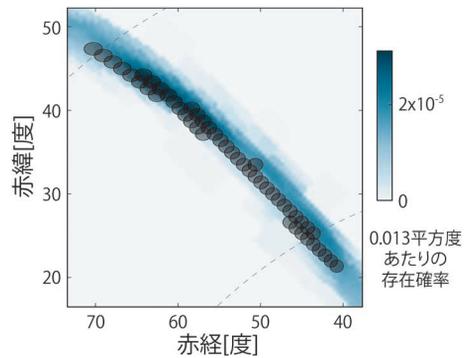


図1 すばる望遠鏡HSCで観測した視野とGW151226の存在確率分布¹⁾。黒い円がHSCで観測した領域を示す。高確率領域が初期の見積もりから最終的に修正されたため、観測した領域と高確率領域は少しだけずれている。

学的に意味のある観測が可能と判断しToO観測を申請した。また、ほかの広視野望遠鏡で発見されていなくてもHSCであれば発見可能な天体もあるはずと考え、「高確率領域を選んで1分程度の露出時間でできるだけ広い範囲をi,zバンドの2色で掃く」という戦略で、内海さんが観測計画を策定した（図1）。その結果、HSC50視野分、重なりを考慮すると約60平方度（GW151226が観測領域内に存在する確率は約10%）の観測を行うことができた。

私は観測当日、大学での講義のあと、新学術領域「重力波天体」の理論班の合宿*2に参加するため新幹線で移動することになっていた。新幹線の中から古澤さんと相談しながらデータ解析の進行状況を確認していたが、データ解析用計算機は90-120秒の露出時間を想定した規模で用意されていたため、徐々に解析が遅れ始め、残念ながら即時データ解析は断念することとなってしまった。

*1 松林さんの連絡の後に、すぐすばる望遠鏡のスケジュールを確認した。GW150914と異なり、北天でのGW151226の到来方向がちょうど夜であったため、「惜しい！」と思った記憶が強く残っている。

*2 合宿では「話したい」という気持ちを抑え、口を滑らせないように気を遣いながら、セッションなどに参加していた。

3. その後の観測とHSCデータ解析

すばる望遠鏡を用いて観測すると、翌日には「STARS2 NextDay Delivery」*3が送られてきて、pythonスクリプトを用いた観測データのダウンロードが可能である。このスクリプトを吉田さんから転送してもらい、HSCの観測データを甲南大学の計算機にダウンロードした。半夜の観測で得られたデータは生データで400 GBほどであるが、解析済みデータは7TBほどになる。一日目の観測で取得したデータについては、ハードディスクの容量不足のため途中で解析が止まるという失敗もあったものの、2016年1月13日に行われた2回目の観測の前に解析を一通り終え、変動天体検出に向けた準備を整えることができた。

2回目の観測後、データを同様にSTARSよりダウンロードし、標準的なデータ解析の後、早速引き算・天体検出を行った。しかし、甲南大学の計算機は理論計算用のマシンを応急的につなげただけという簡単なものであったこともあり、結局候補天体のリストをJ-GEMメンバーに送るまでに1週間を要してしまった。

この時点では、Two Micron All-Sky Survey (2MASS)¹³⁾ カタログを使って位置較正を行ったのみであったが、画像引き算による天体検出という点については十分である。もしこの中に明らかに面白い天体があればほかの望遠鏡・装置による観測を申請する可能性もあったが、残念ながらそのような天体を発見することはできなかった。その後、2016年2月からのS16A期には変動天体の絶対的な明るさを決めるために、重力波可視光対応天体が十分暗くなったと想定される2016年2月6日に参照画像を取得した。HSCで行った一連の観測の詳細は表1にまとめた。

最終的な候補天体選択には等級較正も必要であ

表1 すばる望遠鏡HSCによる観測日と限界等級。

観測日 (世界時)	観測バンド	5 σ 限界等級
2016/1/7	<i>i, z</i>	<i>i</i> : 24.4, <i>z</i> : 23.6
2016/1/13	<i>i, z</i>	<i>i</i> : 24.6, <i>z</i> : 23.8
2016/2/6	<i>i, z</i>	<i>i</i> : 24.4, <i>z</i> : 23.8

る。前述のとおり、これは観測前からの課題であった。観測領域にはHSC一視野分ほどSDSS領域が含まれていたが、そのSDSS領域からほぼ手作業で外挿する必要があるのではないかとおそれながら、2016年3月4日-5日に開催された「HSC時間軸天文学ブレインストーミング研究会」の最中に安田さん、内海さんと等級較正の方法を相談していた。相談の結果、Paul Priceさん（プリンストン大学）を通じたPan-STARRS¹⁴⁾⁻¹⁶⁾の厚意により、リリース前のPan-STARRSカタログを利用した解析ができる運びとなり、1月の観測以来私を悩ませていた問題が解決した。

4. 候補天体

このように検出された候補のリストから重力波可視光対応天体の候補天体を選び出すためにはさらなる条件をかける必要がある。そこで、(1) 通常の超新星探査と同様に、大気の擾乱による光の広がりや点源である星の形と似ていること、重力波可視光対応天体は赤く継続時間が短いという理論予言に基づき(2) 2016年1月7日の*z*バンドの2回の露出でともに検出されていること、(3) 2016年1月から2月にかけて暗くなっていること、の三つを条件として、重力波可視光対応天体候補を選び出した。

選び出された候補を見て愕然としたのは小惑星の多さである。図2左のように、*z*バンドで観測している間にはほとんど動いていないが、時間のあいた*i*バンドの観測では移動している天体が多

*3 STARSとはSubaru Telescope Archive Systemのことで、すばる望遠鏡で取得されたデータはSTARSを通じて観測者に配布される。

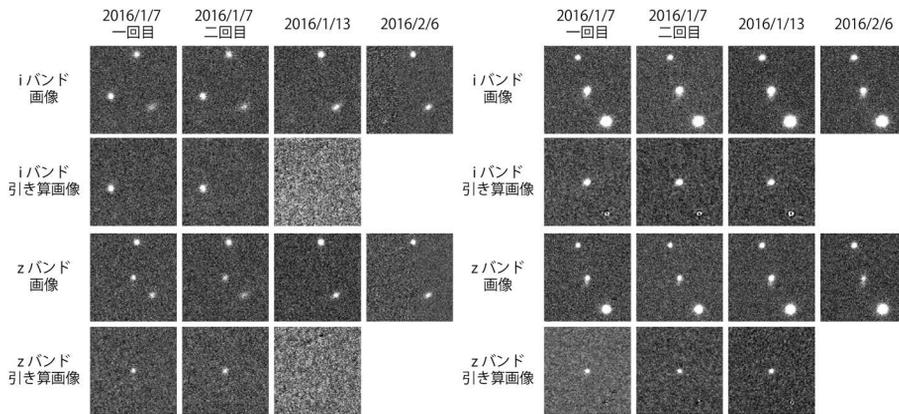


図2 検出された候補天体の例. 左は小惑星, 右はIa型超新星と考えられる. 画像は17秒角四方.

数発見された. このことは, 2016年1月7日のzバンドの2回の露出を連続して行ってしまったことが理由であった.

最終的な候補天体の選択には, 人が目視確認を行うことが必須であるが, 小惑星が残った状態では候補数が非常に多く目視確認は不可能であった. そこで, 小惑星を除去するために上の条件に加えて, iバンドとzバンドの観測の間に小惑星が移動可能な範囲(約45秒角)にiバンドで検出された候補がある候補は除いた*4.

その結果, 約1,300候補が残り, それらをJ-GEMメンバーで目視確認を行い, 天体ではなさそうな候補を除き, さらに, 20等より明るい近傍候補も除いた結果, 60候補が残された. そのうちの 하나가図2右の候補天体である.

僅か3回の2色撮像という限られた観測データから, 残った候補天体の素性を明らかにするために, 変動成分の色等級図(図3)を作成し, 中性子星合体, 中性子星ブラックホール合体の理論モデル¹⁷⁾や超新星の観測データ¹⁸⁾との比較を行った. 例えば, 図2右の天体は赤方偏移 $z=0.1-0.2$ のIa型超新星と同様の色・等級を示し, Ia型超新星と考えられる. このように残った60天体すべてについて確認したところ, 残念ながら, 重力

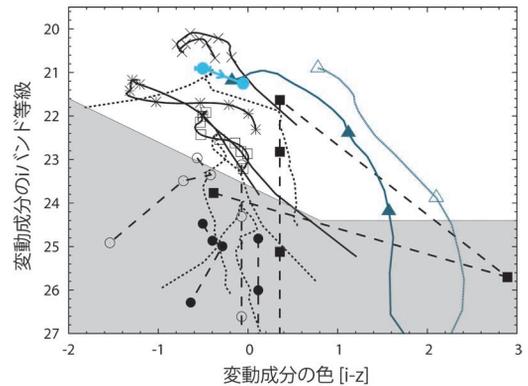


図3 図2右の天体の変動成分の色等級図¹⁾. それぞれ, 候補天体(青丸), 連星中性子星合体(青中抜き三角), 中性子星-ブラックホール合体(青三角), $z=0.1, 0.2, 0.3$ のIa型超新星(黒実線), $z=0.05, 0.1, 0.2$ のII型超新星(黒破線), $z=0.05, 0.1, 0.2$ のIbc型超新星(黒点線)を表す. グレーの領域は今回の観測では検出できない領域を示す.

波可視光対応天体の理論予言と一致する天体を見出すことはできなかった.

しかしながら, HSCによる観測は重力波検出から約13日後と遅かったものの, 実現された限界等級は200 Mpc以内の距離で発生した中性子星-ブラックホール合体であれば検出可能なものであった(図4). この初期成果はJ-GEMに属す

*4 この範囲内には独立な変動天体も存在していると考えられるが諦めざるをえなかった.

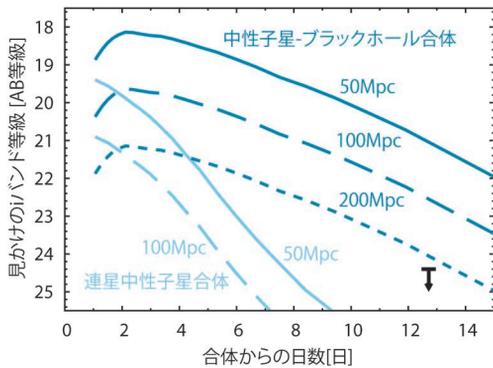


図4 連星中性子星合体（実線：50 Mpc，破線：100 Mpc）および中性子星-ブラックホール合体（実線：50 Mpc，破線：100 Mpc，点線：200 Mpc）からの電磁波放射の*i*バンド光度曲線¹⁷⁾とHSCによる上限値¹⁾の比較。

る他の望遠鏡による探査結果とともに吉田らの論文¹⁾として、特にHSCで発見された変動天体については内海らの論文²⁾として発表される予定である。詳しい内容に興味のある読者はそれらをご参照いただきたい。

5. まとめ

GW151226はHSC観測の5カ月後には440 Mpcの距離にある14.2 M_{\odot} と7.5 M_{\odot} のブラックホールの合体であったことが発表された^{19), *5}。残念ながらHSCを用いた観測でも重力波可視光対応天体と考えられる天体を発見することはできなかった。しかし、実際に重力波が直接検出されそれに対応したすばる望遠鏡HSCを用いた観測が行われたこと、観測スケジュールの関係で早期追観測は行えなかったものの200 Mpc以内の距離で発生した中性子星-ブラックホール合体であれば検出可能な限界等級が実現できたこと、これらの事実はすばる望遠鏡HSCの能力を世界に示すには十分だったと考えられる。実際に、世界中からすばる望遠鏡HSCは重力波可視光対応天体の初検出に向けて期待されており、2016年8月-2017年1月のS16B期

にはAdvanced LIGOによる第二期(O2)観測に合わせて3晩のToO観測が受理されている。

一方で、本稿で紹介したとおり、GW151226に対するデータ解析は予定どおり進んだわけではなかった。今回の貴重な経験を糧に重力波可視光対応天体の即時検出に向けてデータ解析システムや観測戦略の改善を進めていかなければならないと痛感している。Advanced LIGOやO2後期からの参加が期待されているAdvanced Virgo、さらには現在建設中の日本のKAGRAによって、中性子星を含む連星合体が検出され、すばる望遠鏡HSCが重力波源からの電磁波放射を検出し、重力波を含むマルチメッセンジャー天文学が実現する日まで努力を続けていきたい。

謝辞

すばる望遠鏡HSCによる重力波可視対応天体探査観測は、本稿で記載したように、多数の方々の協力なしには実現できませんでした。特に、国立天文台ハワイ観測所の方々の暖かい支援がなければ即時データ解析システムの開発および運用は行えませんでした。この場を借りて深く感謝いたします。

本データ解析には、Large Synoptic Survey Telescope (LSST) データ解析パイプライン²⁰⁾⁻²²⁾を元に、HSCソフトウェアチームによって開発されているHSCデータ解析パイプラインを使用しています。また、本研究はトヨタ財団研究助成プログラム(D11-R-0830)、三菱財団自然科学研究助成(自然科学-25)、山田科学振興財団研究援助による補助を受けています。

*5 この事実はAdvanced LIGOによる論文投稿まで私たちにも知らされていなかった。

参考文献

- 1) Yoshida M., Utsumi Y., Tominaga N., et al., 2016, PASJ, submitted
- 2) Utsumi Y., et al., 2016, in preparation
- 3) 諸隈智貴, 2017, 天文月報110, 14
- 4) Miyazaki S., et al., Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series (2012), Vol. 8446 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, p. 0
- 5) Tominaga N., et al., 2014, The Astronomer's Telegram 6291, 1
- 6) Sako S., et al., Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series (2012), Vol. 8446 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, p. 6
- 7) Morokuma T., et al., 2014, PASJ 66, 114
- 8) Alam S., et al., 2015, ApJS 219, 12
- 9) 松林和也, 2017, 天文月報110, 37
- 10) Itoh R., et al., 2015, GRB Coordinates Network 18740
- 11) Cenko S. B., et al., 2015, GRB Coordinates Network 18762
- 12) Cenko S. B., Kasliwal M. M., Singer L., Bhalerao V., et al., 2016, GRB Coordinates Network 18848
- 13) Skrutskie M. F., et al., 2006, AJ 131, 1163
- 14) Schlafly E. F., et al., 2012, ApJ 756, 158
- 15) Tonry J. L., et al., 2012, ApJ 750, 99
- 16) Magnier E. A., et al., 2013, ApJS 205, 20
- 17) Tanaka M., et al., 2014, ApJ 780, 31
- 18) Nugent P., Kim A., Perlmutter S., 2002, PASP 114, 803
- 19) Abbott B. P., et al., 2016, Phys. Rev. Lett. 116, 241103
- 20) Ivezic Z., et al., 2008, ArXiv e-prints (ArXiv: 0805.2366).
- 21) Axelrod T., Kantor J., Lupton R. H., Pierfederici F.,

- Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series (2010), Vol. 7740 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, p. 15.
- 22) Jurić M., et al., 2015, ArXiv e-prints (ArXiv: 1512.07914).

Search for an Optical Counterpart of GW151226 with Subaru/Hyper Suprime-Cam

Nozomu TOMINAGA

Department of Physics, Faculty of Science and Engineering, Konan University, 8-9-1 Okamoto, Kobe 658-8501, Japan

Abstract: In the O1 observation, advanced LIGO detected second gravitational wave event GW151226 on Dec. 26, 2015. The visibility of the high-probability regions of GW151226 from Subaru telescope is much better than that of GW150914. Therefore, J-GEM collaboration performed follow-up imaging observations with Hyper Suprime-Cam (HSC). This manuscript chronologically describes what happened in the observations with HSC and the analysis of HSC data. If you are interested in scientific results, please refer forthcoming refereed papers.