

HSCによる突発天体サーベイ観測

諸 隈 智 貴

〈東京大学大学院理学系研究科 天文学教育研究センター〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: tmorokuma@ioa.s.u-tokyo.ac.jp



すばるという大望遠鏡の観測時間を300晩も投入したHSC戦略枠観測は、細かい観測日程調整や悪天候の早急な補填の観点も含めて考えると、突発天体サーベイ観測には願ってもない枠組です。私たちは、戦略枠観測開始の数年前から綿密に戦略を練り、特に、総積分時間の最も長いUltraDeepLayerにおいて、高赤方偏移Ia型超新星の観測による高精度宇宙論研究を主目的とした系統的な突発天体サーベイ観測を行う計画を立案しました。まずは、2016年12月から2017年5月にかけて、COSMOS領域において、 g, r, i, z, y の全5バンドでの突発天体サーベイ観測を行い、約2,000の光度変動（増光）天体を発見しました。そのうち約400天体がIa型超新星で、測光的赤方偏移のみわかっている天体も含めると約160天体が赤方偏移1より遠方にあることがわかりました。本稿では、このHSCによる突発天体サーベイ観測の目的とその初期成果について紹介します。

1. 可視光における突発天体サーベイ観測

16世紀のティコ・ブラーヘによる超新星の発見^{*1}やエドウィン・ハッブルによるセファイド型変光星の観測による宇宙膨張の発見など、天文学におけるエポックメイキングな発見の多くは、「変動する」天体の観測によるものです。特に、1990年代にIa型超新星の観測により宇宙の加速膨張が発見^{1), 2)}されて以来、世界中のさまざまな望遠鏡で突発天体サーベイ観測が行われるようになり、次々と新しい突発天体が発見されています。中でも特に明るい突発天体の発見において、日本人のアマチュア観測家の方々の貢献は非常に大きなものがあります³⁾。

突発天体は、その名のとおりに突発的な光度の変動^{*2}を示す天体のことで、ごく一部の天体・現象を除くと、どの方向（どの銀河）のどの天体がいつどのような突発的な光度変動を示すかは基本的には予言不可能です^{*3}。ただ、これまでの研究で、そのような天体の発生頻度はおおよそわかっていますので^{*4}、どのくらいの領域に対してどのくらいの明るさの天体まで観測すればどのくらいの数の突発天体が見つかるはずである、ということの予想はできます。それをもとに観測戦略を練ります。突発天体に限らず、使用する望遠鏡を含めてサーベイ観測戦略を練る際に考慮するパラメータの代表例は「広さ」と「深さ」です。小さな望遠鏡で広く浅く、大きな望遠鏡で狭く深く、というのがよくあるサーベイですが、すばる望遠

*1 “nova stella”（新しい星）と記録されています。

*2 「明るくなる」天体を研究することが多いです。

*3 2016年に発見された重力レンズされた超新星は、異なる像間の光路差による時間差によってある場所での突発現象（増光）が“予言”され、見事に的中しました⁴⁾。

*4 もちろん全くわかっていない現象も多く、そのような天体こそ研究対象として興味深いこともあります⁵⁾。

鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) を使って広く深く、というのがHSC戦略枠観測です^{5),6)}。突発天体サーベイ観測では、この2軸に加えて、「時間」軸が第3の軸として重要ですが、次章で述べるように、HSC戦略枠観測は突発天体サーベイ観測にとっても理想的な枠組となっています。

2. 大口径望遠鏡での突発天体サーベイ観測の困難

一般に、大口径の望遠鏡ほど望遠鏡時間の獲得は難しい(競争倍率が高い)ものです。また、一般に、突発天体サーベイ観測は、研究対象とする突発現象の変動の時間スケールに応じて観測の時間サンプリングを調整する必要があります。しかし、地上望遠鏡は、望遠鏡と天体との間に大気という(私たちにってはいろいろな意味で)邪魔物が存在するため、例えば悪天候などで観測ができなかった場合はデータが欠損してしまいます。すばる望遠鏡のように、共同利用観測の体系をとっている大口径望遠鏡では、ある晩曇ったからといって、じゃあ次の晩に繰り越して観測を行う、などということは不可能です。一方で、通常のプロポーザルでは、そのような、時に起こる悪天候をあらかじめ考慮したうえで観測夜数やスケジュールを立てることは一般には認められません。特に突発天体サーベイ観測にとっては何とももどかしい状況なのです。

HSCができるまでは、すばる望遠鏡での突発天体サーベイ観測は、望遠鏡運用初期にSuprime-Cam^{7),*5)}を用いて行った二つのプロジェクトSubaru Deep Field (SDF)⁸⁾とSubaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS)⁹⁾におけるものが最大でした¹⁰⁾⁻¹²⁾。これらは、複数の所員の所員観測時間を集めた「観測所プロジェクト」と共同利用観測とを併せることで大規模な観測を実現したものでした。しかし、全体としては数年にわたって可視光での撮

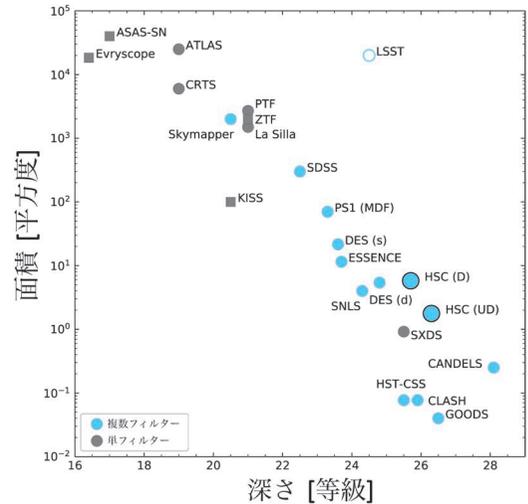


図1 突発天体サーベイ観測のサーベイ面積と深さの関係¹⁶⁾。HSC戦略枠観測突発天体サーベイ観測は、左上(広く浅い)から右下(狭く深い)に並ぶ他のサーベイ観測と比べて右上に位置しており、「広く深い」観測が実現できていることがわかる。

像データが取得されたものの、密にデータが取得された観測期間が2カ月間程度と短く、使用したフィルターも*i*バンド(波長 $0.8\mu\text{m}$)がメインで、ほかのバンドは補助的な使用目的で取得されたのみでした。また、観測領域が1平方度程度に限られて(それでもかなり広いのですが)おり、突発天体一般を研究するには十分とは言えないデータセットでした。ほかでは、例えば、カナダ・フランス・ハワイ望遠鏡(CFHT; 口径3.6 m)による5年間にわたる超新星サーベイ観測Supernova Legacy Survey (SNLS)¹³⁾、ハッブル宇宙望遠鏡を用いた超新星サーベイ観測^{14), 15)}、そのほかたくさんの(主に小口径望遠鏡での)超新星サーベイ観測が行われてきていますが、「広くて深い」サーベイにはなっていませんでした(図1)。

そんな状況を劇的に改善してくれるのが、HSC戦略枠観測のような大規模なサーベイ観測です。

*5 天文月報2018年1, 2, 3号のSuprime-Cam特集もご参照ください。

HSC戦略枠観測を構成する三つの“Layer”(広く浅いWide, 狭く深いUltraDeep, その中間のDeep)のうち, 特にUltraDeep Layerでは, 総積分時間が各バンド十数時間以上にもなりますので, それを時間的に分割して観測することで, 突発天体サーベイ観測を行おうというものです*6. HSC戦略枠観測全体からすると, 突発天体サーベイ観測に割り当てられた時間の割合は小さくなく, 突発天体サーベイ用の観測夜をある程度柔軟に割り当ててもらうことができます. このような自由度の高いスケジューリングのおかげで, 悪天候の補填や複数フィルターでの定期的なデータ取得が可能な素晴らしい「広くて深い」突発天体サーベイ観測が実現できることになったのです.

すばる望遠鏡のような大口径望遠鏡を使って突発天体サーベイ観測を行うことのメリットは, 以下のようにまとめることができます. 突発天体に限りませんが, 一つ目は, 暗い天体まで観測ができますので, 高赤方偏移の天体まで観測が可能となります. 突発天体の代表例である超新星の発生頻度史の研究¹⁷⁾はすばるならではの成果と言えるでしょう. 天体の種類によっては, 赤方偏移4を超える遠方(宇宙の星生成が最も盛んな時期より前)の突発天体も観測可能となります. 二つ目に, 赤方偏移の大きな天体を観測すると, 静止系波長で紫外域の光が可視光域に入ってきますので, 近傍の天体では難しい*7紫外域の観測が可能となります. 最後に, 小さな望遠鏡と比べると巨大な体積を観測することができますので, これまでに知られていなかったような種類の突発天体も見つかるかもしれません.

3. HSC戦略枠観測での突発天体サーベイ観測

本章では, HSC戦略枠プログラムの中で最初

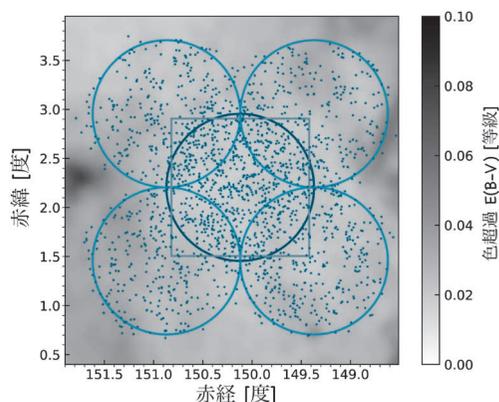


図2 COSMOS領域で発見した突発天体の分布 (Yasuda et al., submitted¹⁶⁾より一部改変). 円はHSCの視野を表す.

の突発天体サーベイ観測となったCOSMOS領域における突発天体サーベイ観測について紹介します.

3.1 COSMOS領域において取得されたHSCによる突発天体サーベイ観測データ

突発天体サーベイ観測は, 戦略枠観測の3年目となる2016年11月末から開始し, 2017年5月までの6カ月間にわたって, 新月の前後1週間程度の間为数日に1度のペースでデータを取得し続けました. ハッブル宇宙望遠鏡で2平方度もの広い領域が観測されたCOSMOS領域の中心をHSCの視野中心と併せたUltraDeep Layer (HSC 1視野分)とその周りを取り囲むように4視野(Deep Layer), 計5視野(8.8平方度)にわたるものです(図2). COSMOS領域は, これまでに多波長での深い観測が行われただけでなく, ハッブル宇宙望遠鏡による高解像度撮像データや大量の分光観測データおよびそれを元にした測光的赤方偏移のデータ等も即時に利用可能であり¹⁸⁾, 突発天体サーベイ観測には最適な領域の一つと言えます. UltraDeep, Deep Layerそれぞれで, g,

*6 このやり方自体は別段真新しいものではなく, さまざまなサーベイでとられてきた方法です.

*7 紫外域の光子は地球大気に吸収・散乱されてしまい地上望遠鏡ではどんなに頑張っても波長 $0.3\mu\text{m}$ 程度より長い波長の光しか観測できません.

r, i, z, y バンドを(8, 9, 13, 13, 11), (6, 6, 8, 7, 7)回ずつ観測することができました^{16), *8}. 当初は各フィルター12回の観測を予定していましたが、(平年以上の悪天候により)一部のバンドでは予定よりはやや少ない観測回数となってしまいましたが、それでもいろいろな研究に使用できる素晴らしいデータです。

以下、いくつかのサイエンスケースについて紹介します。

3.2 Ia型超新星を用いた宇宙論

Ia型超新星は、連星系にある白色矮星の爆発で、少しずつ増えた白色矮星の質量がチャンドラセカール質量(およそ1.4太陽質量)に達した際に起こると考えられています。爆発時の白色矮星の質量がほぼ一定であると考えられることから、その明るさもほぼ一定と期待され、いわゆる標準光源として宇宙の膨張を測るツールとして使われてきました。実際に、1990年代に二つの独立したグループが、宇宙の膨張速度の加速(アインシュタインの言う「宇宙項 Λ 」の存在)を示唆する同様の結果を得た^{1), 2)} ことにより、貢献の大きかった3氏に2011年にノーベル物理学賞が授与されました。この観測の後も、大小さまざまな望遠鏡を用いて超新星サーベイ観測が行われています¹⁹⁾が、 Λ の時間(赤方偏移)進化を調べるため、より精密な観測(および光度較正)、より高赤方偏移での観測が望まれています。

Ia型超新星は、超新星の中でも最も明るい種類の一つであり、既存の可視光望遠鏡では赤方偏移 $z \sim 1.5$ まで観測が可能です^{*9}。すばる望遠鏡は、ハッブル宇宙望遠鏡と並んで高赤方偏移Ia型超新星の観測が可能です。特にHSCの広視野を活かせば、一度に大量のIa型超新星が観測できます。COSMOS領域における戦略的観測では、2,000天体近くの超新星候補天体を発見し、そのうち400天

体あまりがIa型超新星、さらにそのうち60天体(光学的赤方偏移しかわかっていない天体も含めれば160天体)程度は赤方偏移1を超える遠方の天体であることがわかりました¹⁶⁾。私たちは、鈴木尚孝氏を中心にハッブル宇宙望遠鏡の観測時間も100軌道分獲得しており(Cycle 24, 25)、近赤外線の高精度なデータをWFC3というカメラで取得しています。また、すばる望遠鏡やGemini, Keck, VLT, GTC望遠鏡などの8-10 m級望遠鏡やAnglo-Australian望遠鏡(口径4 m)の広視野ファイバー分光器などを使って、超新星およびその母銀河の赤方偏移を決定する試みも同時並行で進めています。Ia型超新星を用いた高精度宇宙論研究は、撮像データに対する測光値の精度への要求が非常に高く、慎重な較正が必要となりますが、これらのデータを合わせ、着実に研究を進めています。

3.3 II型超新星を用いた宇宙論

太陽の8-10倍以上の初期質量をもつ星がその最期に起こす大爆発は、多くの場合、II型超新星と呼ばれます。観測的には、そのスペクトルに水素の存在が確認され、それは爆発前の星の外層に水素が残っていることを示すものです。

このII型超新星を用いた宇宙論パラメータの測定方法の一つである膨張光球法は、1974年に提唱されました²⁰⁾。II型超新星は、Ia型超新星に比べて、典型的に10倍かそれ以上暗いため、これまで赤方偏移 $z \sim 0.2$ までしかその測定がなされてきませんでした。Ia型超新星とは独立な測定方法として依然としてその重要性は高いと言えます。すばる望遠鏡HSCを用いれば、これまで精度の良い測定が難しかった遠方(高赤方偏移)の天体が観測可能です。実際に、私たちは、HSCで発見したII型超新星候補SN 2016jhhに対して口径10 mのKeck望遠鏡LRISを用いて分光観測を行い、赤方偏移 $z = 0.340$ のII型超新星であることを

*8 同時期に行われたWide Layerでの観測も含まれます。

*9 重力レンズ効果による増光により、赤方偏移 $z = 2.22$ のIa型超新星が最近見つかっています⁴⁾。

確認し、このような遠方で初めてII型超新星を用いた宇宙膨張の測定に成功しました²¹⁾。この結果を踏まえて、今後のサーベイ観測でより多くの天体を用いた研究を進める予定です。

3.4 超高輝度超新星

超新星の一部には、Ia型超新星よりも明るく輝くものも存在します。特に、Ia型超新星のおよそ5倍以上の最大光度をもつ天体を総称して超高輝度超新星 (superluminous supernova) と呼んでいます。この天体の正体を説明するモデルとしては、爆発前の星の質量放出により形成された厚いガスに爆発放出物が衝突する際に作られる衝撃波や、新たに生成されたマグネターと呼ばれる高速回転した高磁場をもつ中性子星を伴うモデル、対不安定型超新星爆発モデルなどが存在します。いずれにしても、観測的にはとにかく明るく、かつIa型超新星とは異なり静止系紫外域でも明るいいため、遠方宇宙の天体も可視域で観測可能です。

実際に、私たちは、赤方偏移 $z\sim 2$ の超高輝度超新星3天体の発見に成功しています^{22), 23)}。明るいとはいえ、遠方にあると見かけは暗くなってしまうため、超新星自身やその母銀河の分光観測は難しく、8 m級望遠鏡での観測が必須です。現状、同定できた超高輝度超新星だけを使って求めた発生頻度は、低赤方偏移における発生頻度を宇宙の星形成史に従って外挿した値とすでに同程度の値になっています。今後の観測が進むと、星形成史と超高輝度超新星の発生頻度史の違いから、初期質量関数の赤方偏移進化などが明らかになるかもしれません。

3.5 活動銀河核

ここまでは超新星のことばかり述べてきましたが、宇宙には他にも光度変動を示す天体が存在します。その一つに、銀河中心部における活動銀河核が挙げられます。以下に、HSCの広く深いデー

タを用いて私たちが進めている研究をいくつか紹介します²⁴⁾。

活動銀河核は、ほとんどすべての銀河の中心部に存在すると考えられている超巨大ブラックホールに物質が降り積もる際に重力エネルギーを電磁波の形で放射している天体で、電波からガンマ線にいたるまであらゆる波長で放射および光度変動を示します。紫外線から可視光域では、降着円盤における放射が支配的で、典型的には数カ月から数年の時間スケールで変動を示します。活動銀河核の光度変動を調べることで、その変動メカニズムや、降着円盤の放射がいわゆる標準降着円盤²⁵⁾とどのように異なるのかなどがわかります²⁶⁾。特に、HSCでは暗い遠方の天体まで観測できるので、より低光度の活動銀河核に対する詳細な研究が可能となります。

また、多数の活動銀河核を観測すると、時に、非常に大きな減光を示し、暗い状態をそのままキープする天体が見つかることがあります。“changing-look quasar”と呼ばれ、これは、活動銀河核の活動性が急激に低下したことを示す現象と考えられています²⁷⁾。HSC戦略梓観測で取得するデータにも、このような珍しい天体現象が運良く含まれているかもしれませんので、一生懸命探しているところです。

また、関連する現象として、潮汐破壊現象²⁸⁾が挙げられます。超巨大ブラックホールの付近を通った星が、その潮汐力によって破壊され、一部がブラックホールへ落ち込む際に電磁波を放射する現象です。活動銀河核のように、定常的に物質が降着しているわけではないので、いわゆる“静かなブラックホール”においても観測されます^{*10)}。COSMOS領域における突発天体サーベイ観測でも、潮汐破壊現象の良い候補が見つかっています。

*10 明るくかつ変動する活動銀河核成分がないため、潮汐破壊現象の同定自体は静かなブラックホールのほうが相対的には容易です。

3.6 突発天体サーベイ観測研究における機械学習の適用

近年、天文学におけるさまざまな分野で利用され始めている機械学習は、突発天体サーベイにおいても有効です。天文月報2018年7号の池田思朗・森井幹雄氏の稿²⁹⁾にもあるように、HSC戦略枠観測の突発天体サーベイ観測では、2014年から、吉田直紀氏を代表とする「広域撮像探査観測のビッグデータ分析による統計計算宇宙物理学」³⁰⁾の枠組の中で、いち早くHSCデータにおける効率的な突発天体検出についての取り組みを進めてきました³¹⁾。詳細は、池田・森井氏の稿に譲りますが、これまで天文学者が泥臭く目視確認してきた¹¹⁾、もしくは、とある適切だと思ふ基準で選別してきた作業を、学習した“機械”によって統一的に高速に行っています。この“機械”は、発見した突発天体に対してHSC観測直後に即時追観測を行う際の即時データ解析にも、論文化する際の最終的なデータ解析にも使用しています^{32), 33)}。

2020年代には広視野サーベイ専用望遠鏡Large Synoptic Survey Telescope (LSST, 口径8.4 m, 実効的には6.5 m)による大規模観測が開始され、10年間のサーベイ期間中に1,000万個を超える数の超新星の発見が予想されています³⁴⁾。これらを全て追観測(特に分光観測)することは不可能で、測光情報のみから超新星のタイプ分類を行い、宇宙論をはじめとする研究を進める必要があります。これを機械学習を用いて行う試みがすでに始まっていて、2018年12月にはThe Photometric LSST Astronomical Time-Series Classification Challenge (PLAsTiCC)^{35), 36)}と呼ばれるコンペが行われました。ここで優秀な結果を残した“機械”が実際のサーベイでも使われていくのでしょうか。

4. 今 後

本稿では、戦略枠観測における取り組みについてのみ紹介してきましたが、HSCがいかに突発天

体サーベイ観測に強力かは、共同利用観測における成果にも現れています。超新星における成果^{37), 38)}のみならず、重力波³⁹⁾⁻⁴²⁾やIceCube高エネルギーニュートリノ⁴³⁾、fast radio burst⁴³⁾などの位置決定精度の悪い突発現象に対する成果や、活動銀河核⁴⁴⁾、近傍銀河全体を一度に覆うような効率的な変動天体探査の成果⁴⁵⁾からも読み取れます。また、本稿では紹介できませんでしたが、HSCの深い撮像データの特性を活かして、母銀河が付随しないと思われる超新星の母銀河の有無についての研究や重力レンズクエーサーの探査なども現在進んでいます。

2018年、すばる望遠鏡はキラウエア火山の活動による継続的な地震や悪天候などの天災に見舞われ、予定していたSXDS領域における2回目の突発天体サーベイ観測も実施することができませんでした。2019-2020年に2回目の突発天体サーベイ観測の開始を予定していますので、新しい成果にご期待ください。

謝 辞

本稿の内容は、これまで長年にわたるHSC戦略枠観測TransientワーキンググループおよびSupernovaワーキンググループのメンバーとの共同研究成果に基づいています。特に、守屋堯氏、安田直樹氏、富永望氏、田中雅臣氏、鈴木尚孝氏、高橋一郎氏、山口正輝氏、前田啓一氏、Jian Jiang氏、加藤貴弘氏、吉田直紀氏を代表とするCRESTグループのみなさま、浦田裕次氏、Lijin Huang氏に感謝します。また、この特集を取りまとめてくださった小宮山裕天文月報編集委員長に敬意を表します。

参考文献

- 1) Riess, A. G., et al., 1998, AJ, 116, 1009
- 2) Perlmutter, S., et al., 1999, ApJ, 517, 565
- 3) <https://www.nayoro-obs.jp/stellanova2018/> (2019.01.15)
- 4) Rubin, D., et al., 2018, ApJ, 866, 65

- 5) 宮崎聡, 2019, 天文月報, 112, 80
- 6) 高田昌広, 2019, 天文月報, 112, 89
- 7) Miyazaki, S., et al., 2002, PASJ, 54, 833
- 8) Kashikawa, N., et al., 2004, PASJ, 56, 1011
- 9) Furusawa, H., et al., 2008, ApJS, 176, 1
- 10) 土居守, 安田直樹, 2018, 天文月報, 111, 88
- 11) Morokuma, T., et al., 2008a, ApJ, 676, 163
- 12) Morokuma, T., et al., 2008b, ApJ, 676, 121
- 13) Astier, P., et al., 2006, A&A, 447, 31
- 14) Dawson, K. S., et al., 2009, AJ, 138, 1271
- 15) Postman, M., et al., 2012, ApJS, 199, 25
- 16) Yasuda, N., et al., 2019, PASJ, submitted
- 17) Okumura, J. E., et al., 2014, PASJ, 66, 49
- 18) Laigle, C., et al., 2016, ApJS, 224, 24
- 19) Suzuki, N., et al., 2012, ApJ, 746, 85
- 20) Kirshner, R. P., & Kwan, J., 1974, ApJ, 193, 27
- 21) de Jaeger, T., et al., 2017, MNRAS, 472, 4233
- 22) Moriya, T. J., et al., 2019, ApJ, in press. (arXiv:1801.08240)
- 23) Curtin, C., et al., 2019, ApJ, in press. (arXiv:1801.08241)
- 24) 長尾透, 2019, 天文月報, 112, 1234
- 25) Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A., 1973, A&A, 24, 337
- 26) Kokubo, M., et al., 2014, ApJ, 783, 46
- 27) MacLeod, C. L., et al., 2016, MNRAS, 457, 389
- 28) 川室太希, 2018, 天文月報, 111, 856
- 29) 池田思朗, 森井幹雄, 2018, 天文月報, 111, 460
- 30) https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-5.html (2019.01.15)
- 31) Morii, M., et al., 2016, PASJ, 68, 104
- 32) Tominaga, N., et al., 2015, The Astronomer's Telegram, 7927
- 33) Tominaga, N., et al., 2018a, PASJ, 70, 103
- 34) LSST Science Collaboration, et al., 2009, arXiv:0912.0201
- 35) <https://plasticcblog.wordpress.com> (2018.12.31)
- 36) Malz, A., et al., 2018, arXiv:1809.11145
- 37) Tanaka, M., et al., 2016, ApJ, 819, 5
- 38) Jiang, J.-A., et al., 2017, Nature, 550, 80
- 39) Tominaga, N., et al., 2018b, PASJ, 70, 28
- 40) Utsumi, Y., et al., 2018, PASJ, 70, 1
- 41) 富永望, 2017, 天文月報, 110, 19
- 42) 内海洋輔, 2018, 天文月報, 111, 84
- 43) IceCube Collaboration, et al., 2018, Science, 361, eaat1378
- 44) Morokuma, T., et al., 2016, PASJ, 68, 40
- 45) Niikura, H., et al., 2019, Nature Astronomy, in press.

Hyper Suprime-Cam Transient Surveys in the Strategic Survey Program

Tomoki MOROKUMA

Institute of Astronomy, University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan

Abstract: We have conducted the first HSC-SSP *wide* and *deep* transient survey in the COSMOS field in 2016–2017 down to depths of ~ 27 mag. We found about 2,000 transient objects, including ~ 400 Type Ia supernovae (SNe Ia) and ~ 160 at $z > 1$. With this large sample, we are studying Type Ia supernova cosmology, Type II supernova cosmology, superluminous supernovae, active galactic nuclei and related transient phenomena, and so on. The second transient survey in the SXDS field is scheduled to be done in 2019–2020.