

光・赤外線大学間連携 共通自動即時測光パイプ ラインCARPの開発



斉藤



諸隈

斉藤 嘉彦

〈東京工業大学大学院理工学研究科基礎物理学専攻 〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1 H-29〉
e-mail: saitoys@hp.phys.titech.ac.jp

諸隈 智貴

〈東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: tmorokuma@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

光・赤外線大学間連携事業の枠組で行う連携観測の多くでは、異なる観測装置で複数の波長域にわたる測光データが取得される。装置ごとに異なる方法の解析は、同一天体に対して系統的に比較可能な解析結果を提示できないという点で好ましくない。特に、ガンマ線バーストのような突発天体の観測の場合は、その後のフォローアップ観測のため素早い解析が求められ、科学的成果にも大きく影響する。今回これらの問題を解決するため、光・赤外線大学間連携事業の参加機関の装置で得られた撮像データに対して共通に利用可能な自動即時測光パイプラインの開発を行った。

1. 背景

光・赤外線大学間連携事業（これ以降は単に「大学間連携事業」とする）において各観測所が所有する装置で共通に使用可能な即時測光パイプラインの必要性は当事業が発足した当初から指摘されていた。

当事業における科学的成果が期待される現象であるガンマ線バースト（GRB）の地上望遠鏡でのフォローアップ撮像観測にはいくつかの厳しい要求がある。一つはGRBのガンマ線のフレアを捉える衛星の情報に基づき可及的速やかに観測を開始するということである。GRBの現象において重要な情報は最初の数秒から数時間以内に含まれており、できる限り早い観測を行わなければならない。ガンマ線で捉えたフレアの情報を秒単位で

地上望遠鏡に送信する装置は主にSwift衛星の搭載装置であるBurst Alert Telescope（BAT）である。このBATから送られてくる座標情報は典型的には3分角半径の誤差をもつ円、すなわちエラーサークルとして与えられる。

二つめの要求は地上望遠鏡の観測ではこのエラーサークルの中に可視光・赤外線におけるGRBの対応天体を見つけることである。このBATからの情報の数分後には、同じくSwift衛星に搭載されているX-Ray Telescope（XRT）というX線の観測装置による、より正確な座標情報（5秒角以下の位置決定精度）が届く場合が一般的だが、その情報がすぐにこない場合も想定しなければならない。それを行うためにはエラーサークル内の天体を検出しその中で未知の天体であり、かつ明るさの変動が見られる天体を探し、座

標を特定するということが必要となる。

そして最後は波長方向の情報を得ることである。例えば、可視光では対応天体が見つからないにもかかわらず赤外線では対応天体が見つかるような場合は高赤方偏移の現象である可能性があり、宇宙の最遠方クラスの現象であればさらに口径の大きな望遠鏡で分光観測によるフォローアップをする必要がある¹⁾。そのためにできる限り早く各観測装置での測光結果が必要になる。

一方、当事業は異なる光赤外線望遠鏡を系統的に連携させる国内初の試みであり、これらの要求を満たすような測光解析環境が整っている状態から始まったわけではなかった。よって、そのような要求を満たすために大学間連携事業における共通自動即時測光パイプラインの開発が企画された。

また当事業ではプロポーザルによる提案によって、天体の長期にわたるモニター観測を行うような例も存在する。このような観測で得られる画像データは観測を行う装置が複数存在するため、必然的に膨大な画像データが得られる場合が生じてくる。実際、筆者の一人は、連携事業開始当初に同僚が当事業においてミリ秒パルサーのキャンペーン観測を行った²⁾際に得られた多観測装置の膨大な撮像データの解析に泣きそうになりながら取り組んでいる姿を目の当たりにしていた。共通化パイプラインはこのような観測を行った場合の撮像データに対しても使用可能であることも視野に入れるべきであると考えた。

このパイプラインの開発は大学間連携事業の一環として行われ、その設計から開発に至るまでをわれわれが担当することとなった。ソフトウェア開発のプロでもないわれわれにとって決して楽な仕事ではなかったが、大学間連携事業の成果の一つとして提供までこぎつけたのは幸いであった。

ちなみにこの解析パイプラインの正式名称はCARPである。Common-use Automated Realtime Photometryの頭文字からとったものだが、本稿

の筆者が二人とも広島東洋カープのファンであることは不思議な偶然である。

2. 手探りの開発

2.1 スタートとゴールの設定

大雑把な目的ははっきりしているものの、今一つどこから手をつけていいのか、そして具体的なゴールをどこに設定するかがよくわからないまま開発が始まった。本来であれば生データを一次解析から測光結果を出すまでの一環したパイプラインを用意するのが一番良いのであろう。しかし一次解析の方法は装置ごとに個性が強くなるため、一つの装置につき一つのパイプラインを作る作業に等しくなる。担当であるわれわれ二人でそれらの作業を行うのは現実的ではないことは明らかであった。

このような開発のハードルを下げてくれたのは、現在の参加機関に限っていえば一次解析を行うパイプラインはほとんどの機関ですでに用意されているという事実である。実際、開発当初「一次解析用処理のパイプラインを用意できない機関は要相談」ということをうたっていたが、そのような相談はどの機関からもこなかった。なので開発すべきは一次解析済みのデータを測光するためのパイプラインということになり、そこがスタート地点となる。

ゴールとしては測光値を出力するというのは当たり前ではあるが、どのような較正を行った測光値を出力するのかということは観測の目的によって異なる。このパイプラインでは視野内にあるすべてのカタログに登録された天体（カタログ天体）を使って較正を行う方法とある固定されたカタログ天体を使って較正を行う方法、そして機械等級のみを出力しその較正はユーザーに任せる方法をオプションによって選択可能とする。その際、アパーチャ測光におけるアパーチャ半径やバックグラウンドの評価に使う領域の大きさもユーザーがオプションで指定することができるよ

うにする。さらに自動かつ即時に測光結果を出すためには入力要求はなるべく少なくすることを基本方針とした。

よって目指すところは光度曲線を描くために必要な観測時間ごとの測光結果を必要な較正方法によって少ないコマンド入力により出力することである。

2.2 共通化の手始め

最初に着手すべきであると考えたのは「装置間での共通化」に必要な作業である。すぐに思いつく方法は取得した画像データから情報を得て、その情報を自動判別することで一つのパイプラインに共通化の機能をもたせることである。観測装置は異なっても得られる画像データの保存形式はFITS形式である。このFITS形式の画像にはバイナリのデータ配列に加えてASCIIテキストで書かれたヘッダ部分があり、このヘッダの内容からその画像に関する種々の情報が得られる。

手始めに各観測機関のFITS画像におけるヘッダ情報の現状を知るために、画像データを収集する作業を開始した。その結果、各機関の観測装置で得られたFITS画像のキーワードとその定義が不ぞろいであることを知り、まず共通キーワードを決定するところから作業が始まった。ここで役に立ったのは国立天文台天文データセンターが発行している「FITSの手引き」である。この手引きをもとに共通のヘッダ情報を決定し、さらに標準ではない情報についても共通のキーワードを決定して各観測装置のヘッダ情報として加えてもらうようお願いをした。

たいへんだったのは観測所によっては共通のキーワードである名前が存在してもその定義が異なる場合であった。そういう場合であっても既存キーワードの定義変更を強いるわけにはいかないので、新たに共通のキーワードとその定義を決めてそれをどの観測所でも追加してもらう必要があった。このようなヘッダ情報の取りまとめ作業は慣れないこともあってかなりの時間を要した。

2.3 測光パイプラインの開発

共通化の基本方針を整えた後はソフトウェアの具体的な開発を開始した。メインターゲットとしてGRB、つまり点源を想定しており、銀河面付近等の星の混んだ領域でなければ、アパーチャ（開口）測光によって機械等級を自動的に得ることはそれほど難しいことではない。しかし、明るさの較正を自動的に行うことも必要になるので、画像データには正確な天体の座標情報が正しく貼られている必要があり、それを明るさの較正に用いるカタログに登録された天体（カタログ天体）とマッチングするということが可能でなければならない。

天体の座標情報を正しく貼るという作業も各観測装置で処理済みであることを前提とした。この作業は視野の狭い装置では困難な場合も生じる。その場合は自動解析という処理は不可能となる。

カタログ天体とのマッチングについては、幸いなことに東京工業大学にはすでに毎日自動観測で得られるデータの自動測光を行うためのパイプラインが用意されており、そのサブルーチンを流用することで実現可能であった。このことにより開発の労力が相当軽減した。しかし一方で、東京工業大学のパイプラインは明野50cm望遠鏡に特化されており、共通化するための作業には力を注ぐ必要があった。

カタログ天体を参照するもとなるカタログも可視光か赤外では当然異なり、さらには使用しているフィルターの種類によっても異なる。これらの自動的な判断も各画像データのFITSヘッダの情報によって行うことが可能である。

サブルーチンを流用した明野望遠鏡用解析パイプラインがPythonというプログラム言語で作成されていたため、われわれもそれに従ってPythonによるソフトウェアの開発を行った。PyRAFというPython用のユーティリティをインストールすれば、標準的に使用されている画像解析ソフトIRAFのコマンドをスクリプト内で使用できるた

めたいへん便利である。この言語は比較的平易にプログラムが組めるといふ点でも利点がある。

3. ソフトウェアの構成

まず実際にユーザーが使用することになるのはアパーチャ測光を行うスクリプトと複数画像を一括してアパーチャ測光を行うスクリプトの二つである。それぞれのスクリプトの処理の流れを図1、2に示した。

先に述べた装置間の共通化を担うため、専用のスクリプトを用意し装置毎に異なるパラメータをそのスクリプト内で定義した。流れ図に示されているのはそのような装置の違いによるパラメータの判別が適切である状況下での処理の流れを示している。

ソフトウェアを使用する際に必要となるのは共通ヘッダを備えた画像データと測光を行う天体の

座標情報を示した座標リストである。

3.1 アパーチャ測光

アパーチャ測光ではある画像について座標リストで与えられた座標全てについてアパーチャ測光を実行する。アパーチャ測光には三つの出力が可能である。一つは等級の較正をせずに座標リストにあるすべての天体の機械等級を出力する。二つ目は視野内にあるカタログ星を自動的に全て抽出し、その等級と機械等級からゼロ点等級を求めて較正済み等級を出力する。三つ目は座標リストにある2番目以降の天体を自動的にカタログの等級値と比較し、その結果を用いて座標リストの1番目の天体の較正済み等級値を出力する。

3.2 複数画像の一括測光

このスクリプトは上記のアパーチャ測光を使用し複数の画像について一括で測光を行い、光度曲線を描くために「撮像した時間」とその時間での天体の「等級とその誤差」を示したリストを出力する。このスクリプトでは単純に座標リストにあ

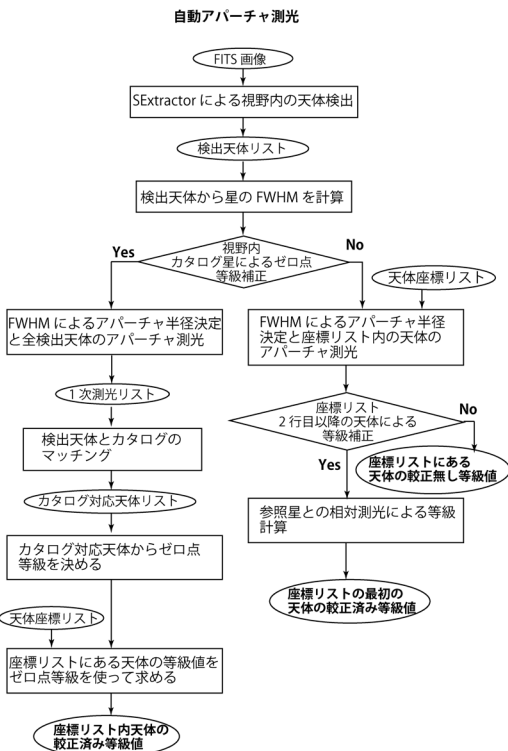


図1 アパーチャ測光の流れ図。

同一視野の複数画像データの一括測光

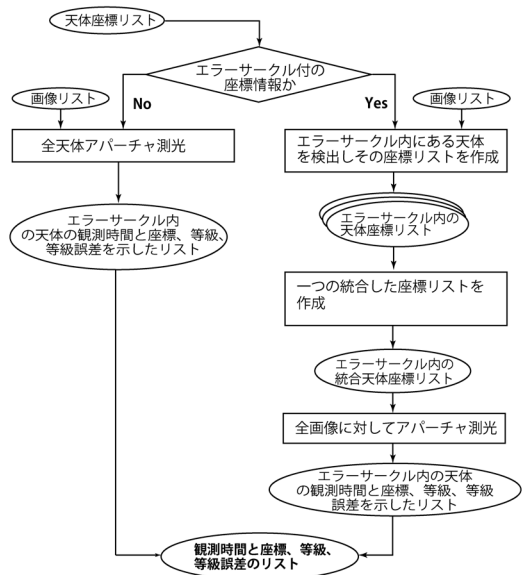


図2 同一視野における複数画像の一括測光の流れ図。

る天体の測光だけでなく、座標リスト上にエラーサークルの半径の値が与えられている場合は自動的にエラーサークル内にある天体すべての測光も行う。これはGRBをはじめとする突発天体に対応するための機能である。

4. 実用化に向けて

4.1 GRBの即時測光試験

CARPを使用したGRB検出試験の良い例として2011年に明野50 cm望遠鏡で取得したあるGRBを使用した。想定しているケースはこのGRBを検出した際に3分角という半径と中心座標が与えられたエラーサークルの中で現象が起こったという情報だけが与えられているケースである。GRBの可視・赤外での観測において重要なことはGRBに対応した天体の有無を早期に判断することである。

先に述べたように、この3分角半径のエラーサークルはGRBが発見された際にSwift衛星のBATから送られてくる最初の座標情報である。地上望遠鏡はその情報に基づいて観測を開始しそのエラーサークルの中に変動している天体があるかどうかを判定しなければならない。今回の例に使用したGRBの実際の視野は図3に示した。このために使用するスクリプトの機能は複数画像の一括測光のうちエラーサークル内の天体をすべて測光し、自動的にゼロ点等級を計算した結果を用いて較正した等級を出力するというものである。

スクリプトの測光結果の出力をもとに光度曲線を描いた結果が図4である。この光度曲線を描くために要する時間は特別なパソコンを使用しなくても数分程度で終了する。一番時間を要するのはカタログ天体とのマッチングの部分であり、カタログデータとのアクセスの時間に依存する。この光度曲線において明るさの変動基準は3シグマよりも大きな場合には線の色を濃くしている。図中の天体3、天体4がその基準を満たしているが、実際のGRBは天体4のほうであり太い線で示し

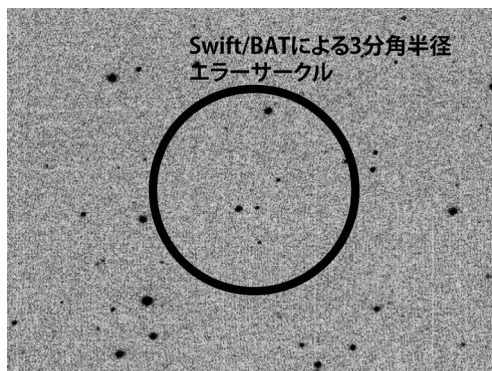


図3 2011年に観測されたGRB発生領域における明野50 cm望遠鏡・MITSuMEカメラRバンド画像とSwift衛星のBATの情報から決まったエラーサークル。

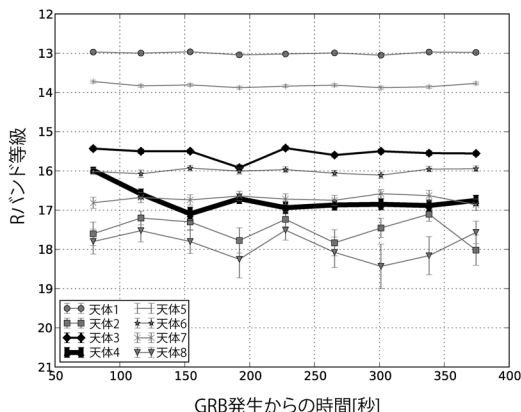


図4 エラーサークル内で検出された天体の270秒間の光度曲線。変動があると判定された天体が二つあり、それを濃い線で示している。そのうち太い線で示したほうが真のGRBである。

ている。

実際の判断はこの図に示した30秒間露出を9回行った270秒間の変動だけでなく、その後の変動も考慮しながら行うが、この例は変動が顕著である場合は早期に対応天体を見いだすことが可能であることを示している。

4.2 自動測光をサポートする装置

本稿を執筆した2016年1月現在でCARPの動作をサポートしている観測装置を表1に示す。近

表1 2015年11月現在CARPがサポートする撮像装置.

望遠鏡	口径 [m]	装置	フィルター	視野 (分角)	参照カタログ
なゆた	2.00	NIC	J, H, K_s	2.7×2.7	2MASS
岡山188 cm	1.88	ISLE	J, H, K, K_s	4.3×4.3	2MASS
ピリカ	1.6	MSI	B, V, R, I	3.3×3.3	GSC2.3
		NaCS	g, r, i, z	8×4	SDSS
むりかぶし	1.5	MITSuME	g, R, I	12.3×12.3	SDSS/GSC2.3
かなた	1.5	HOWPol	B, V, R, I	$\phi 6$	GSC2.3
IRSF	1.4	SIRIUS	J, H, K_s	7.7×7.7	2MASS
木曾シュミット	1.05	KWFC	B, V, R, I	132×132	GSC2.3
			u, g, r, i, z		SDSS
miniTAO	1.0	ANIR	B, V, R, I	6×6	GSC2.3
			J, H, K_s		2MASS
鹿児島大1 m	1.0	赤外線カメラ	J, H, K	5.5×5.5	2MASS
MITSuME明野	0.5	MITSuME	g, R, I	27×27	SDSS/GSC2.3
MITSuME岡山	0.5	MITSuME	g, R, I	26×26	SDSS/GSC2.3

い将来、大学間連携事業の参加機関である埼玉大学のSaCRA望遠鏡によって得られたデータも加わる予定である。先に述べたようにサポートされる装置に重要なことは「一次解析済みのデータ提供が可能」であり、さらに「可能な限り天体の座標情報も正しく貼り付けた画像データを提供することが可能」であることである。参照するカタログは赤外では2MASSであり、可視光ではSDSSかGSC2.3である。SDSSのカタログは全天域をカバーしているわけではないので、ある視野でカタログ天体が見つからない場合は全天域をカバーしているGSC2.3を使用する。視野の広い画像はカタログ天体のマッチングがしやすいため必然的に自動解析による較正済みの測光値を得やすくなる。カタログ天体が見つからないような画像データの測光は機械等級を自動的に求めてから手動で較正を行う必要がある。

5. 今後の発展

本稿では大学間連携事業における共通化自動即時測光パイプラインの開発に至る経緯とソフトウェアの概要を述べてきた。現状としては手元にあるデータを用いて各機関の撮像データの測光を行い動作試験をしたという段階である。

また今回は言及しなかったが、精密な測光を行うのであれば各装置間の波長ごとの感度が完全に一致しているわけではないことの補正（カラーターム補正）も必要になってくる。しかし、GRBの即時解析にはそこまでの精度は必要ではなく、さらに少なくともこれまで行ったキャンペーン観測において、カラーターム補正が必要となるような測光の結果が得られたことはなかった。一方でスクリプト内ではカラーターム補正用の機能は実装可能な状態にはなっている。なので各装置ごとに補正係数が求まっていれば、それをパラメータとして与えることは可能である。

大学間連携の参加機関ごとにGRBの観測体制は異なり単純なソフトウェアの開発とはまた別な話にはなるが、CARPを使用した自動解析を行い、さらにその結果の共有体制を整えることは今後の課題であろう。

謝 辞

本稿で行った研究は大学間連携事業の一環として行ったものです。CARPの開発に関して協力していただいた皆様にはたいへん感謝しております。特に、共通化にあたり各観測所で情報のとりまとめを行っていただいた秋田谷洋氏、面高俊宏氏、黒田大介氏、高橋隼氏、高橋英則氏、永山貴宏氏、野上大作氏、花山秀和氏、本原顕太郎氏、渡辺誠氏の協力なしにCARPの開発は実現しませんでした。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 河合誠之, 2011, 天文月報104, 609
- 2) 谷津陽一, 河合誠之, 片岡淳, 高橋洋輔, 2013, 天文月報106, 254

Development of CARP for OISTER

Yoshihiko SAITO¹⁾ and Tomoki MOROKUMA²⁾

¹⁾ Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, H-29, 2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8550, Japan

²⁾ Institute of Astronomy, School of Science, The University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: CARP (Common-use Automated Realtime Photometry) is the data processing pipeline for optical or near-infrared images obtained with instruments of the telescopes that are owned by the collaborated universities of OISTER (Optical and Infrared Synergetic Telescopes for Education and Research). OISTER is a project for constructing a network of multi-wavelength observation and interactive education among the universities which own small/mid diameter telescope. The advantage of this project is prompt observations of transient objects like gamma-ray burst and long term monitoring observations of variable objects in multi-wavelength. We have developed CARP for analyzing these data efficiently. Our purpose requires that CARP should output calibrated magnitudes of targets and make the light curves without complicate procedure. We have achieved automated photometry for images of all instruments.