

# Suprime-Cam にまつわるエトセトラ

## 八木 雅文

〈国立天文台 光赤外研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: yagi.masafumi@nao.ac.jp



キーワード「彗星・小惑星」「近傍銀河・銀河団」「ゴースト・クロストーク」「宇宙線」「ソフトウェア開発」を手がかりに、日々薄れゆく記憶を振り絞りつつ、よしなしごとを書かせていただきました。

### 1. あなたのデータを数えましょう

2017年、平成時代の終焉まで残すところ2年を切った東京の夏は、梅雨明け宣言される前から連日酷暑が続いております。「さあて何書くなー」と半ばぼーっとキーボードを叩いていた私でしたが、ふと思い立ち、すばるの公開アーカイブ (SMOKA<sup>1), \*1</sup>) の Suprime-Cam<sup>2</sup>) のデータの中で自分が観測者だったものは一体どれくらいあるのか数えてみることにしました。いわゆるエゴサーチですね!<sup>\*2</sup> Suprime-Cam は CCD6 枚から始まって、8枚、9枚、10枚と時代とともに CCD が増え、それに伴って1回の露光当たりのデータファイルの数は変わっていったのですが、例えば CCD 番号2番、昔は si005s、2008年夏の CCD 更新から最期までは satsuki<sup>\*3</sup> と呼ばれた CCD で撮られた OBJECT データを数えることで撮影回数を数えることができます<sup>\*4</sup>。今のところ、すばるユーザに私と同姓の方はいらっしゃらないみたいなので、データの FITS ヘッダの OBSERVER キーワードで Yagi という文字列で検索。結果、調べ

た時点では、公開データ中にはテストデータ等も含めて3,466回でした。公開データには2016年以降のデータはまだほとんど入ってないので最終結果は変わってくるかもしれませんが、全体のおよそ4%ほどの観測に参加していたようです。観測した夜数を数えてみると、ファーストライトのあった1999年は18夜、2000年は31夜と、装置立ち上げ時期は多かったものの、それ以降は年0-5夜の観測参加でした。「観測に参加してデータがとれた夜数」は18年半で81夜程度。案外というかなるほどというか、私はそれほど観測時間ももらってないです。年に数日観測し、残りはそれをいかに料理するかに腐心する。うん、確かにそんな感じでした。

データを更に見ていくと、一番枚数が多かった目標天体は暗黒星雲、次がかみのけ座銀河団やしし座銀河団などの銀河団、それから近くの銀河、初期のテストデータ、標準星などが続いています。この辺りから今回のネタを拾うことにしましょう。もっともこの中のおとめ座銀河団やかみのけ座銀河団での広がった H $\alpha$  輝線天体の話は

<sup>\*1</sup> <http://smoka.nao.ac.jp/>

<sup>\*2</sup> もちろん違う。なおエゴサーチは英語だと egosurf と言うようで、日本語と英語でチガフ。

<sup>\*3</sup> 新 CCD 名 <https://www.naoj.org/Observing/Instruments/SCam/ccd.html> にラナが入らなかったのは「劇場版から選んだから」だそうです (もっとも総集編としての劇場版はあったようですが)。

<sup>\*4</sup> これをやろうとすると2001年以前分は SMOKA よりも STARS2 を使ったほうが簡単。

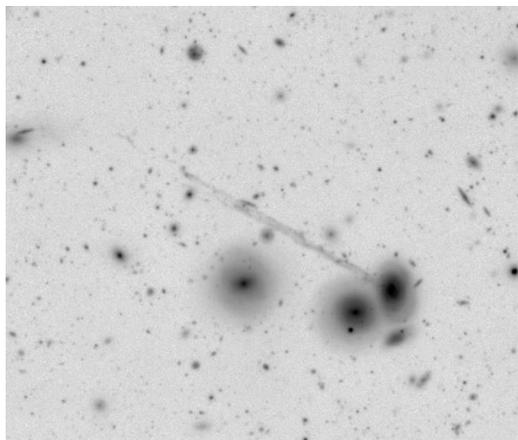


図1 かみのけ座銀河団の中のある銀河から細長く流れ出す水素ガスが、何故かは知らねど電離され赤く映えるさま。カラーでお見せできず残念です。以前の広報に使った絵よりもちょっと広い範囲を切り出しています。白黒反転。

ウェブニュース<sup>\*5-\*</sup>や国立天文台ニュース<sup>\*9,\*10</sup>等で取り上げていただきましたし（無料で読めます）今回ページ数も溢れそうなので、担当編集委員さんの発注にいきなり反して銀河銀河団関連は図を貼るだけで軽く流します（図1）。カラーでお見せできず残念です。

私は光赤外線天文学の中でも光サイドの観測者（自称）なのですが、本記事にはこの後、暗黒（ダーク）サイドの話が多数出てきます。天文業界って何故か暗黒とかダークとか好きですよ。暗黒物質（ダークマター）だけでは飽き足らず暗黒エネルギー（ダークエネルギー）も仮定し、Suprime-Camの観測は暗夜（ダークナイト）<sup>\*11</sup>です。そんなわけでまずは暗黒星雲（ダーククラウド）の話から。

## 2. 汝が暗黒星雲を覗き込むとき

昔話から始まります。昔々、と言ってもほんのちょっとだけ昔、2000年の初夏の話です。と始めてみたものの、どうもこの頃の記憶は多くが忘却の彼方なうえ、別の記憶と混ざったりあまつさえ改変されてたりして怖いのです<sup>3),4)</sup>。日記を書く習慣のない私にとって、古いメールの中に思い出がいっぱいだったりします。便りを頼りに読んでいくと1999年1月のSuprime-Camのファーストライトから1年余りを経て、漸くにして<sup>\*12</sup>第一期観測装置の多くがその前年度末（2000年2月頃）にはファーストライトを終え、初夏の候には望遠鏡

<sup>\*5</sup> [https://www.naoj.org/Pressrelease/2002/04/15/j\\_index.html](https://www.naoj.org/Pressrelease/2002/04/15/j_index.html) 銀河の周りに広がる超巨大ガス雲の発見。

<sup>\*6</sup> [https://www.naoj.org/Pressrelease/2007/03/05/j\\_index.html](https://www.naoj.org/Pressrelease/2007/03/05/j_index.html) すばる、銀河からまっすぐのびる謎の水素ガス雲を発見。

<sup>\*7</sup> [https://www.naoj.org/Pressrelease/2008/10/06/j\\_index.html](https://www.naoj.org/Pressrelease/2008/10/06/j_index.html) すばる、銀河から飛び出す火の玉を発見。

<sup>\*8</sup> [https://www.naoj.org/Pressrelease/2010/11/09/j\\_index.html](https://www.naoj.org/Pressrelease/2010/11/09/j_index.html) すばる望遠鏡、かみのけ座銀河団に広がった電離水素ガス雲を多数発見。こう「すばる〇〇を発見」という形式縛りでもあるのかというような表題群。

<sup>\*9</sup> 2002年6月号 <https://www.nao.ac.jp/naoj-news/2002.html>

<sup>\*10</sup> 2007年7月号 <https://www.nao.ac.jp/naoj-news/2007.html>

<sup>\*11</sup> 月の無い夜、新月前後一週間を暗夜（ダークナイト）と呼びます（dark knight じゃなく dark night です。）これは「ある晩が暗夜かどうか」という形で定義されていますので、三日月が沈みきらぬ朧月夜も暗夜です。Suprime-Camは主にダークナイトに観測してましたが、時には上弦や下弦の前後1週間、グレイナイトにも観測していました。グレイナイトの日本語定訳は、すみませんわかりませんでした。

<sup>\*12</sup> 1999年9月上旬、山頂で疲労困憊していた観測者が夜半過ぎに星座早見盤のツールだったかLST（地方恒星時）表示だったかを操作コンソール上でぱっと見て、「次はこの天体」と望遠鏡を向けるコマンドを実行したら、実は画面表示の更新がされておらず、とっくに沈んでいた天体に向けようとしてしまっていた、という誤操作をします（この辺、疲労困憊してたので記憶が曖昧です）。間が悪いことに昼間の試験のためとかで、ソフトでもハードでも二重三重の望遠鏡保護機構がすべて人為的に外されていたため、望遠鏡は何者にも止められず地平線まで向こうとして、途中で主鏡が自分の重さに耐えられずに滑って、そこで望遠鏡もようやく気づいて止まり、その後で人々も気づくという事故がありました。（この辺り断片的にしかな確認できません。記憶違いや誤認でしたら申し訳ありません。）その復旧もあり、後ろにずれこんだという事情ももしかするとあったのかもしれない。

には載せない調整の時期に入っていたようです。一方、ファーストライトから先んじていたSuprime-Camは望遠鏡に搭載され、主焦点光学系のさらなる調整試験観測を行っていたようです。2週間連続で山頂観測とか、まるで最近のHyper Suprime-Cam (HSC) のようなヘビーローテーション時代。観測データがじゃんじゃん溢れてました。「PR用データをとるように命令があった」との情報もあつたりしましたが、このときPR用として撮られたデータの半分くらいは結局PRに使われぬままアーカイブの底に静かに眠っているような気がします<sup>\*13</sup>。優雅な時代でした。

さて、そんな主焦点のSuprime-Cam、経緯はよく思い出せないのですが、望遠鏡建設に携わった方々も望遠鏡時間を一定程度使う権利があるということでハワイ観測所内の所員時間的な募集があつたようです。その中に、「銀河系内の暗黒星雲を撮ってみてほしい」という提案がありました。なお暗黒星雲とは暗黒物質の雲ではありません。もし暗黒物質の雲があつたら、それはおそらくほとんど透明なんだろうと思いますが、それはそれとしてそんな暗黒星雲。言われるがままに撮りました。結果、提案者ご本人が「いやあ、暗黒星雲って本当に真っ黒なんだねえ」とコメントしたというような、ほんと何も写ってないデータでした<sup>\*14</sup> (図2)。優雅な時代でした。私は一体何故こんな話を最初にしたのですか？ 伏線は後ほど回収されます。

巡る季節の中で時は流れて2007年。「輝線天体を高効率で探すためにSuprime-Camのフィルターを入れる場所にグリズムを入れてスリットレス分光を行う」というグリズムフィルター計画を風の噂に聞きました。「うわあ、すごく面白そう……」と思いつつ、そこで何故かふと「移動す

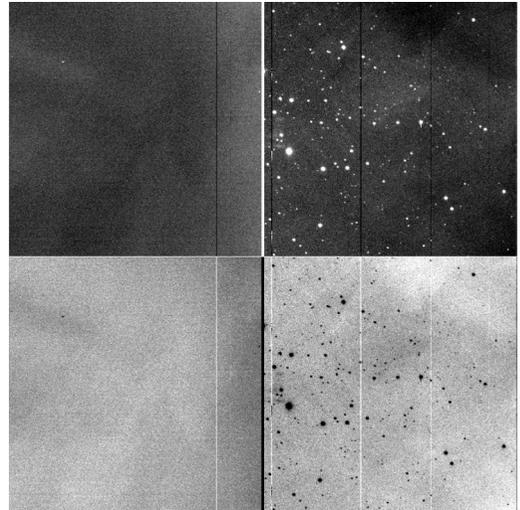


図2 左上: 暗黒星雲。2000年のデータを再解析してみた。およそ5分角四方。右上: 暗黒星雲のちょっと東隣。いやあ、暗黒星雲って本当に真っ黒ですねえ。下: 上の2枚だと見づらいという声があつたので白黒反転してみた。

る天体をグリズムフィルターで撮ると、移動する向きさえよければスペクトルの時間変化が見られるんじゃないだろうか」と、素頓狂なことを思いついてしまいました。移動して見える太陽系小天体(主に小惑星)をグリズムフィルターで撮って、その移動方向がグリズムの分散方向、つまりスペクトルの波長方向の垂直に近ければ、スペクトルの時間変化が1回の撮像で撮れてしまうんじゃないかなあ、と。絵を描くの苦手なのですが、頑張ってみました(図3上)。

しかし一筋縄ではいきません。スリットレス分光で遭遇する問題の一つは別天体のスペクトルとの重なりです。移動天体のスペクトルが他の星や銀河のスペクトルに重なっては何がなんだかかわらなくなります(図3下)。普通によく行われているスリットレス分光では、グリズムを空に対して

<sup>\*13</sup> という原稿を書いて推敲していたら、この時期のデータから作られた広報画像が国立天文台の今週の1枚<https://www.nao.ac.jp/gallery/weekly/>で、ちょうど再利用されました(執筆当時)。

<sup>\*14</sup> 今回原稿を書く際に改めてデータを確認してみると、他の手前の星もちらほらとは写っていたんです。ほんと人間の記憶って簡単に改変されるものなのですね<sup>3),4)</sup>。お一怖。

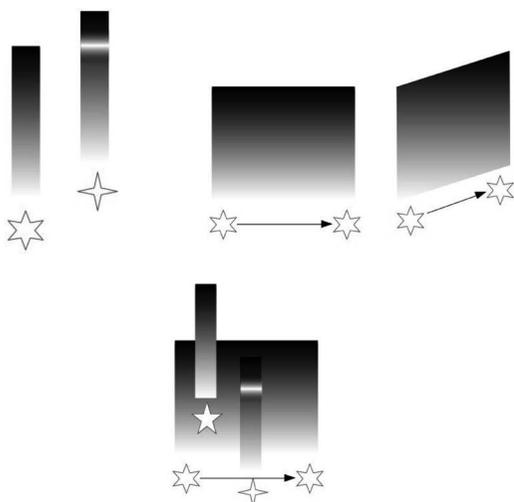


図3 (左上) グリズムフィルターでは天体それぞれでスペクトルが出る。(右上) 移動天体では、天体の移動に沿ってスペクトルが伸びて撮られる。(下) 途中で天体があるとスペクトルが重なってわけがわからないことになる。

90度回す (Suprime-Cam の場合は観測装置も一緒に回ります) ことで、スペクトルの出る方向を変えて、どちらかは助かるようにするのですが、移動天体ではそれもいきません。天体の移動方向とスペクトルの波長方向が重なってしまうと、さらにわけがわからなくなるからです。

そのときです。暗黒星雲の故事がフラッシュバックし、過ぎ去った昔が鮮やかに蘇ります。音声付きで、「いやあ、暗黒星雲って本当に真っ黒なんだねえ」そう、確かに暗黒星雲は真っ暗でした。しかし、小惑星は写っていたのです! (図4) 「ああ、小惑星って暗黒星雲より手前にあるんだ」と、当時深く納得したものでした。ということは? 暗黒星雲バックに移動する小惑星を撮れば、別天体のスペクトルとの重なりリスクが大幅に軽減されるのです!!

そんなわけで小惑星のプロフェッショナルの方と相談し観測の科学的な意義を担当していただき、技術的側面を私が担当しつつ観測提案をします。移動天体をスリットレス分光するメリット



図4 暗黒星雲の一部を普通にSuprime-Cam (R-band) で撮った2000年当時の画像の一部切り出し。上が1分露光、下が5分露光。白黒反転。左にいて位置が動いている(下の絵では伸びてる)のが移動天体、右端にるのが普通の星。2009年にも同じ場所を撮っていて、右端の天体は同じ場所にいました。

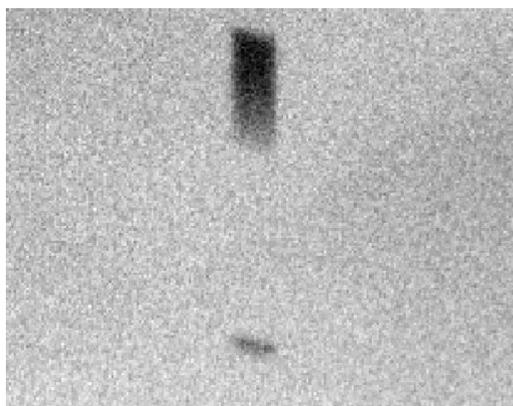


図5 実際に得られた移動天体のスペクトルの例。下に横長に見えているのが小惑星。やや右下方向に傾いて移動してました。上のほうに見えているのがそのスペクトル。白黒反転しています。

は、軌道とスペクトルを同時に得ることができることです。移動天体のスペクトルを得ようとする場合、普通はまず撮像観測を数日行って軌道を確定し、その軌道から移動を予測しつつ改めて非恒星追尾で分光観測を行うという二段階になってしまうのですが、スリットレス分光であればこれを1回の観測で完結できるのでした。暗黒星雲を背景の暗幕に使うことで、重なり問題も大幅に改善されています。とりあえず1晩観測時間がもらえて観測し、データ解析し、移動天体の低分散スペクトルの結果も出して、と、とんどん拍子に進み

ます。海王星より遠い太陽系外縁天体の発見と分光も行えました(図5)。

成功裏の1年目を足がかりに2年目は3晩もらい、データも取ってまた解析したのですが、そこでいくつか問題に直面します。まず「グリズムの波長分散が去年校正した結果と違う……」という問題が見つかります。この原因は、どうやら「Suprime-Camは、フィルターとCCDの間の距離は気にしない設計であった」ため、フィルターとCCDの間の距離がオーバーホールのために僅かに変化していた、ということのようなのでした<sup>\*15</sup>。一般的な撮像観測ではフィルターが多少前後に移動しようと無視できる範囲の変化しかないため、大部分の観測においてフィルター位置に依存する影響はありません。一方、グリズムで分散されたスペクトルは、グリズムからCCDまでの距離が遠くなるとそれだけ拡大されてCCDに届くため、この距離の変化の影響をもろに被るのです。また、一番最初に考えていた時間変動に関しても、「小惑星の自転などによって反射光強度が時間変化しているのか、薄雲がかかったりして天候条件が変化しているのか、区別することが難しい」という困難にぶつかります。この弱点は天候が不安定なときのデータを見るまで思い至りませんでした。迂闊。さらに2年目のデータは天候が2日目に不安定だったことで、小惑星の分光中の位置とCCD上での移動方向を正確に求めることがうまくいけなくなるという問題も出ます。そんなこんなで解析の難儀さと戦い続け、打ちのめされたまま現在に至ります。俺たちの戦いはこれからだ。

### 3. 空から探査機がおりてくる

そんな暗黒星雲を撮りながら暗黒星雲を全然見

ていなかった前章の観測ですが、実は最適な観測の時期が決まっています。まず、小惑星のスペクトルの観測には、地球から見て太陽の真裏、衝の位置にある時期が好ましいです。小惑星が一番速く空を移動し、また一番明るくなるからです。一方、暗黒星雲の条件として、Suprime-Camの視野くらいの大きさがあって、しかも小惑星が多く見つかる黄道付近の暗黒星雲は(ほぼ)唯一、へびつかい座 $\rho$ 星周辺だけです<sup>\*16</sup>。ここが真夜中に南中するのは5月末なので、暗黒星雲を見るふりして本当は小惑星を見ている前章の観測はその時期が最適です。ただ、月が明るい期間(明夜)にはSuprime-Camの観測は行われないというかそもそも望遠鏡に搭載されないので、新月が毎年10日ぐらいつつ動くことによって、小惑星・イン・ザ・ダーククラウド観測のベストは年によって最大で半月ほど前後することになります。2010年に観測時間を割り当てていただいたのは、そんなわけで10日ほど後ろにズレたハワイ時間2010年6月の10日から12日でした。その最終日、ハワイ時間2010年6月12日に空から落ちてきたのが小惑星探査機「はやぶさ」です<sup>\*17</sup>。はやぶさが落ちてくる日も含めた前3日間にSuprime-Camを私たちが使ってたのは、そういう偶然です。

遡ること3カ月、2010年春の天文学会。私は移動天体のグリズム観測の初期成果を、普段まったく出席しない太陽系セッションでポスター発表していました。ポスター前で立ち話をしていたとき、はやぶさの方から「すばる望遠鏡などで、はやぶさを光学観測できないか(広報的な意味で)」という話を伺います。すばるでの上半期(正確には2月から7月)の観測の日程は前年12月の上旬に公表されるので、ハワイ時間2010年6月12日

<sup>\*15</sup> この推測はCCD面とフィルター面の2回反射によるゴースト(光学的な迷光で写る偽の像。後ほど再度出てきます)の大きさの解析でも裏づけられています。ゴーストの大きさもフィルターとCCDの間の距離に敏感なのです。

<sup>\*16</sup> 黄道からどこまで離れても許すか次第で、おうし座の暗黒星雲も候補になりえます。

<sup>\*17</sup> [https://www.naoj.org/Pressrelease/2010/06/13/j\\_index.html](https://www.naoj.org/Pressrelease/2010/06/13/j_index.html) すばる望遠鏡で「はやぶさ」の撮影成功!

の観測が私たちであることは春の学会(3月)の時点でわかってました。その場では結局どういう話になったんだっただか覚えてないのですが、確か「観測所に話を通すといいんじゃないですかね」的な話になったような気がします。そのまま話は立ち消えます。と思いきや、暗黒星雲観測初日、ハワイ時間6/10の午後2時半頃にいきなり再度話が舞い降りてきます。はやぶさを観測できないか、と。「うおお、せめてもうちょっと早く言ってくれよおおお！」と内心叫びつつも<sup>\*18</sup>、共同研究者からも「観測の邪魔にならないければ、すばるがはやぶさを見たということは全世界のはやぶさファンに喜ばれることは間違いないし、私としてもうれしい」的なコメントがあり、「まあ、仕方ない、やるかー」と、突貫で進めることになります<sup>\*19</sup>。

まずは、はやぶさの方に「マウナケアから見たときのはやぶさの予想位置」を計算していただきます。同時に、観測所のえらい人に「夕方の薄明中に、はやぶさ観測させてください」というお伺いをたてます。ありがたいことに、このときの観測所の対応は早く「本観測に食い込まないすきま時間の利用だからオッケー」が出ます<sup>\*20</sup>。予想位置情報を頂いたのが午後5時ちょっと前。内容を見てみると、はやぶさは意外と速いスピードで夜空を駆けていくようです。すばる望遠鏡には移動天体を追いかける非恒星追尾機能があるのですが、当時(観測初日の観測開始数時間前)の現場には、この非恒星追尾機能をどう使うのか自信をもっている人がいませんでした。そこで、確実に動作すると分かっている機能、恒星追尾で観測することに決断します。この観測は1回きり、時間との戦いだったので、本当にうまくいくか一抹の

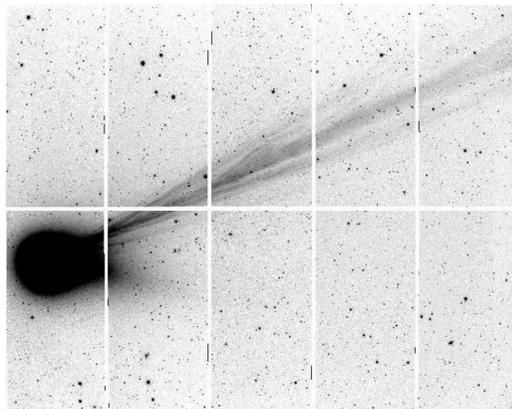


図6 明け方に撮られたマックノート彗星(C/2009 R1)。これも恒星追尾。V-band。白黒反転。

不安がないでもなかった機能を試すのは怖かったのと、あとの半分は趣味の問題、「背景の星が流れて移動天体が止まっている絵柄がなんとなく好みじゃないから」でした。

恒星追尾で観測する場合、視野の中を移動天体が動いていくので、変な構図にしまうと最悪の場合CCD間のギャップに落ち続けますし、複数のCCDにまたがるようだと見つけ辛くなってしまいます。その辺り、あらかじめ観測計画を十分練っておくことが大切で、構図を考えて観測手順書(これは計算機に送るコマンドの羅列みたいなものです)を作成するのです。その辺りの作業も何とか間に合わせて、午後7時50分頃から観測を行いました。全く影も形も写りませんでした。残念。諦めず2日目(6/11)も挑戦します。全く影も形も写りませんでした。残念。現場にいた共同研究者から「暗すぎて写らないんじゃないの?」という悲観的な声も出始めますが、本観測の暗黒星雲と、明け方にこれまたすきま時間で撮っていたマックノート彗星(C/2009 R1)はがつつり撮

<sup>\*18</sup> 直前になるまで突入軌道が確定しなかったため連絡を控えていた、旨の記事をその後読みました<sup>5)</sup>。

<sup>\*19</sup> 文面から滲み出てますが、私自身は全然はやぶさ自体には思い入れがないのです。高速で動く地球近接天体を撮る、ということへの興味はありましたが。

<sup>\*20</sup> 2017年現在ではHSCの「すきま時間」などは原則観測所に没収とされてしまいますが、当時はこういう融通がきいたのです。諸外国との競争がますます激しさを増すなか、我々はすきま時間まで動員していく。

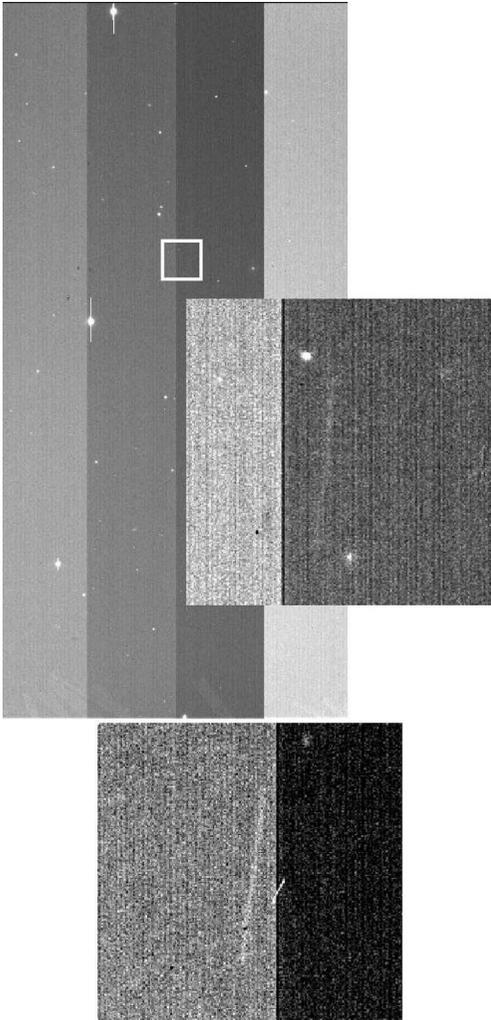


図7 帰ってきたはやぶさの姿を捉えたデータ。CCDチップ全体図(左上)と、白枠(45秒角四方)内の拡大(右上)。拡大図中央で縦にひょろっと写っているのがはやぶさ。1分露光。その3分後(下)。中央でちょっと斜めに伸びて写っているのがはやぶさ。夕方から夜に向かう時間帯で、空が暗くなった分、見やすくなっています。

れていた(図6)心は穏やかでした。

そしていよいよ地球衝突当日(6/12)。3日目の正直で、見事に捉えることに成功したのです。

よかった。そもそも天気が晴れてて本当によかった。すばるで最初に写ったのがこの図7です\*<sup>21</sup>。

観測してみて実際にははやぶさの姿を見るまで迂闊にも全く気づいていなかったのですが、1分間も露光するとははやぶさの像は伸びて光が分散され、一方で周辺の空はそのまま足されるので、結果的に損をしていました。1分露光を7枚撮った時点で「こりゃ露光時間短くしたほうがいいな」と気づいて5秒露光に切り替え、それ以降のデータを使ったのが、ウェブ等に出ている画像になります\*<sup>17</sup>。気づいてよかった。

ハワイ時間午後8時(東京は昼の3時)、関係者に「写りました」の一報を入れます。そして「すきま時間」の約束通り、午後8時10分ちょっと前には本来の観測モード、暗黒星雲に移行しました。午後8時40分に片手間で作ったはやぶさ GIF 動画を共同研究者とハワイ観測所担当者に連絡して見せびらかし、共有&公開していいですよ、と裁可を仰ぎます。……ハワイ観測所からOKが出たのは午後9時半過ぎ。もう少し遅れていたらカナダフランスハワイ望遠鏡(CFHT)に先を越されていたところでした。ああ、冷や汗\*<sup>22</sup>。

このはやぶさの観測で、Suprime-Camは露光時間には気を遣っていても露光時刻には結構無頓着だという弱点も露呈します。実際、得られた時刻と位置データ11点のうち、3点は時刻が2-6秒ほどズレていないと説明がつかないため、その後の解析<sup>6)</sup>には使われていません。何故そんなことになっているのか? Suprime-Camでは、シャッターを開いてから閉じるまでの「時間」は観測装置に内蔵されているシャッター制御専用の時計(ストップウォッチみたいなものです)でがっちり制御されています。シャッターを開いてから閉じるまでの時間は天体の明るさの測定にとって極めて重要だからです。一方、記録される

\*<sup>21</sup> 世界で一番最初に観測したのは、アメリカのアリゾナにあるテナグラ天文台らしいです<sup>6)</sup>。すばるは解析が速かったので最初に報告できることになりました。

\*<sup>22</sup> この辺に関する言い訳と愚痴を書いたのですが見苦しいのでカット。

「時刻」は、望遠鏡からちょっと離れた制御棟にある計算機が観測装置に命令を送ったタイミングを、計算機内蔵のそれほど精度が高くない（1日に1-数秒ずれるかもしれない）時計で見た時刻です。観測装置が命令を受け取ってからシャッターを実際に動かし始めるまで多少もたついて遅れがあったとしても、気づくことができない仕組みにもなってしまうています。これはSuprime-Cam開発当時、シャッター制御部分の担当者が「『時刻』にそんな高い精度を必要とする用途はないだろうから、まあいいよね」と判断して作ってしまったツケです。そんな、1秒以下の精度が必要となる観測を、まさかその担当者自身が10年以上経った後にする羽目になるとは思ってもみませんでした。なんたる因果応報。

時刻に関しては、Suprime-Camはシャッターが大きい（20 cm以上あります）ので左端と右端で露光開始時刻が1.2秒ほど違うのですが、どちらから先に露光を開始したか、つまりシャッターが右から左に動いたか左から右に動いたかの情報が記録されていないという問題もあります。はやぶさの場合は、そこはきちんと考慮して視野中央で撮ったので、0.6秒オフセットすることで解決しています。実際のところ、すばる望遠鏡全体が時刻関連の扱いに関しては比較的緩い体質のようで（あくまで個人の印象です）、例えば山頂計算機の時刻同期が止まっているのを、計算機間で数秒ずれて通信が失敗するようになるまで誰も気づかなかったという事例が過去にあったとか。「すばる望遠鏡の地球上の座標（北緯・西経）がはっきりしない」という状態が10年ほど続いていた時期もありました。「建設前に出典が良く分からない地図を目の子で読んでえいっと決めた座標を、そのままずっと使い続けてきたから」らしい

のですが、これも地球に近い天体を観測するときには問題になります。実際、はやぶさの場合は同じマウナケアにあるすばるとCFHTの数百mの位置の違いを気にする必要があったのでした<sup>6)</sup>。

はやぶさの観測でそのほか思い出に残っているのは、はやぶさの観測が終わって本観測（暗黒星雲のほうです）を開始していた私たちに、某研究所の広報さんから「撮影した領域は何座になるのか」という質問がきたことです。「おいおい、座標は知ってるんだから、そういう趣味の情報調査は自力でやれよ広報」（これでもかなりマイルドな表現に修正しております）と内心で超毒吐きながら丁寧にwikipediaとgoogle skyのURL付けてお返ししました。と、この故事で私が伝えたいことは、「観測中の観測者はナーバスなので、邪魔をしてはならぬ」です<sup>\*23</sup>。当時の広報さん、おわかりになりましたら参考にしてください。ともあれ、すばるは世界で最初にはやぶさを見つけた報告をすることができました。結果オーライ。

#### 4. ダークにダークはほとんど写らないが役に立つ

依頼書にあった2-6ページの目安原稿量を既に軽々と超過しておりますが、もうちょっとだけ続けさせていただけようと思います。暗黒つながりで超暗黒銀河<sup>\*24</sup>の話も考えましたが、それはまた別の機会もあるでしょうし、本章ではダークの話について書きます。ここで言うダークとは暗電流のことです。

暗電流の話をするにはまずCCDの原理の話になります。「興味ないね」という方は次の段落まで飛ばしてください。CCDは、やってきた光の強さを電荷の数を数えて測ります。CCDのそれぞれの画素（ピクセル）の中には、電荷が溜まる

<sup>\*23</sup> ファーストライトの頃、山頂計算機の/dev/audioを叩いて音を鳴らそうと奮闘していた私も、きっと周囲から同様の感情をもたれていたんだろうなあとか思ったり。露光終了通知音を作りたかつたんですけどね（言い訳）。

<sup>\*24</sup> [https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2015/06/22/j\\_index.html](https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2015/06/22/j_index.html) 854個もの「超暗黒銀河」をすばる望遠鏡アーカイブから発見。

ことができる状態としてエネルギーの高い状態と低い状態の二つがあります。観測の最初に CCD をリセットした直後には電荷は全部低い状態にいますが、観測を開始して画素に光の粒子（光子）が当たると、ある一定の確率（6割とか8割とか）で電荷が一つエネルギーの低い状態から高い状態に移ります（励起されます）。観測が終わってデータを読むときに励起された電荷の数を数えて、観測している間にそのピクセルに光子がどれだけ当たったかに換算できるのです。ところが、低い状態にいる電荷は常に必ずそこに落ち着いているわけではなく、光を受けたわけでもないのに励起されてしまうことが、これまた一定の確率であります<sup>\*25</sup>。この現象により、暗くしておいても時間とともに励起された電荷が増えているように見えます。これを「暗電流」と呼びます。更に詳しく正確な解説は天文学会100周年記念教科書<sup>7)</sup>等を参照してみてください。

暗電流の量を測るには、シャッターを閉じて、暗い状態で CCD を待機させて、例えば5分とか10分とか後に読み出します。このデータを「ダークフレーム」<sup>\*26</sup>略して「ダーク」と呼びます。つまり、ダークはダークフレームを指す場合と暗電流を指す場合があるのです。ややこしい。電荷がどれだけ落ち着いていられるかは CCD の温度と関係があり、温度が低いと暗電流も少なくなります。このため、Suprime-Cam も冷凍機を使って CCD の温度をマイナス 100℃ くらいに冷やして使っていました。Suprime-Cam の CCD は3世代くらいあるのですが、冷凍機が不調で冷えなくなった時以外はどれもこの「暗電流」は無視できるくらい（具体的には5分で1カウントとか）<sup>\*27</sup>

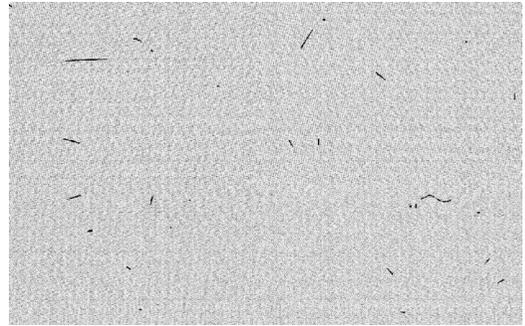


図8 5分ダークの例。中心付近の拡大。白黒反転。

しか沸きません。ダークにダークはほとんど写らないのです。

図8にダークフレームの例を示しました。暗電流は写っていないのですが、何か細かく細かいものがぶちぶち写っています。これらが通称「宇宙線（コスミックレイ）」<sup>\*28</sup>と呼ばれる放射線イベントです。光と違って、宇宙線はシャッターなどお構いなしに突き抜けてきて（背後からも真空容器を突き抜けてきます）CCDをぶち抜きます。宇宙線が当たった画素中では、複数の電荷がエネルギーをもらって励起されます。宇宙線は観測装置の正面以外からも来るので、斜めに入った場合には、画素を突き抜けて隣の画素に入ることを繰り返し、いくつもの画素で電荷を励起しつつ進みます。その結果、読み出したデータは図8のようになるのでした。何故うにゃっと曲がってるのがあるのかはよく知りません。

宇宙線は2008年以前に使われていた CCD では気にならない程度だったのですが、2008年の CCD 交換で赤外線に対する感度を上げるため厚くした検出器に更新された結果、宇宙線に対する感度も上がり、頻繁に見かけるようになりました。

<sup>\*25</sup> 逆にエネルギーが高い状態から低い状態に移ることもありうるのですが、エネルギーが低い状態にいる奴が圧倒的に多いため、低い状態から高い状態に移るパターンが圧倒的に多く、そちらだけ考えていて OK です。

<sup>\*26</sup> 本記事でのダークフレームは dark frame であって dark flame ではないです。

<sup>\*27</sup> CCD を読み出したときのデータは整数値の「カウント」です。Suprime-Cam の場合、1 カウントはおおよそ電荷 3-4 個くらいです。

<sup>\*28</sup> CCD に写る「宇宙線」が本当に宇宙から来たのか、それとも地上の環境放射線（例えば望遠鏡や観測装置の中の長寿命放射性元素の崩壊とか）なのかの切り分けはされていないのだと昔教わり、そのように私は理解しています。

宇宙線は通常の観測のときも写り、解析にはとても邪魔です。特に長時間露光したときに目標天体に宇宙線が当たったりするとがっかりします。ある時、「宇宙線って、望遠鏡が高い高度を向いているときと低い高度のときで違いあるのかな」と気になりました。仮に低高度のほうが宇宙線の影響が少ないなら、「宇宙線の影響を嫌うような観測の場合は高度がある程度低くなってから撮ったほうがいい」ということになるかもしれないからです。まっすぐ伸びている宇宙線はCCDを突き抜けたと仮定すれば、CCDの厚みと写った長さからどちら方向から来たか予想ができます。望遠鏡をあちこちに向けて撮ったダークフレームが多数あれば、宇宙線は空から来たのが多いのかそうでないのかも統計がとれます。このような解析を行おうと思うと、図8のように宇宙線だけしか写っていないダークフレームは役立ちます。

という方向で調査を始めたものの、すぐ脇道にそれます<sup>\*29</sup>。まず、時々ダークが増えている(1分で千カウントとか)ことに気づきます。これは調べていくと、「シャッターを閉じていてもドームの中が明るいと光が漏れこんでしまう」ことが原因らしいとわかりました<sup>\*30</sup>。

さらにダークを見ていくうちに、ある場所に宇宙線が当たると他の場所でカウントが下がり、負の光を浴びたように見える現象がどうにも気になり始めます。これは「クロストーク」と呼ばれる現象で、ダークの中の宇宙線に限らず、普通の観測で明るい星が入っても見られます(図9)。クロストークはSuprime-Camに限らず、他の観測所でも様々な装置で見られているのですが、大量に電荷を読み出したときは読み出し回路の電圧の安定が支えきれず、同時に読み出している他のデータの値にも影響してしまう、ということなのだろうと私はもやっと理解しています。Suprime-Cam



図9 クロストークの例。これは1回の露光でくっきり見えている。明るい星の中心があふれて流れ出した帯(ブルーミング)に対応する位置で空がへこんで見えるクロストーク。宇宙線もちらほら見えている。

の場合は、「天体との相対位置が変わらないクロストークが出ている」というのが大きな問題になります。一般的に天文撮像データは少しずつ見る方向をずらしながら多数のデータを撮って、天体の位置が同じ場所に来るように重ね合わせるのですが、天体との相対位置が変わらないクロストークは同じ場所で重ねられるため、枚数を重ねれば重ねるほど影響が強くなるからです。1回では影響が見えないクロストークも何十枚も重ねた結果ではくっきりとそこだけ暗くなってしまいます。

このクロストークをいろいろ調べる際に、ダークフレームがとても役に立つというのが一つの発見でした<sup>8)</sup>。適切な条件で撮ったダークは5分で1カウント程度未満であることが保証されていますので、それ以上のカウントの変化は、光や暗電流によるものではなく、宇宙線か、その宇宙線によるクロストークによるものだと考えられます。かつ、宇宙線は幅が狭い領域に強い信号を発生させるので、「どの信号がどのようなクロストークを生むのか」という相関を切り分けて確認しやすいのです。ダークフレームは曇っていて観測ができない日にもドームを閉じてドーム内を暗くすれば次々と撮ることができます。曇った夜の時間を有効活用できるのです。この方向で「観測ができない曇った夜には大量にダークを撮ってください

\*29 どうも私の研究は脇道に逸れつづけることで回っている気がしないでもないです。

\*30 これは「Suprime-Camではドームフラットはまづいことになっている」ということのはずなんだけど、あまり皆さん気にしておられないようで。

い」と頼み込んで、そのデータを元にクロストークの性質を研究しました。この脇道にそれた方向は完結しましたが、宇宙線がどこから来るのかという当初の興味は「球面上の密度分布をうまく絵に描けない」というかなり初歩的技術の未熟さゆえに途中停滞中だったりしています。この記事書いてて思い出しました。

そんなこんなで、多分Suprime-Camユーザの中では私が一番ダークに傾倒していたんじゃないかと思います。めげせダークフレームマスターです。ともあれ、本来ダークフレームはダークを測定するために撮られていましたが、それ以外の興味にも斯様に有用なものでした。

## 5. ゴーストがホントにいっぱい

ゴーストで思い浮かぶものは人それぞれかと思いますが、本稿でのゴーストとは光学的ゴースト、本来通るはずのルートを外れてCCDに届いてしまった光がCCD上で作るパターンを指しています。道を外れた光自体は迷光と呼ばれたりします。例えば、木星が視野の外だけどそばにいるような時に撮られた画像が図10のようになります。こういう視野外からの迷光については、一体どこでどう反射したらこういう形状になるのか、いまだに全く理解が進んでいないみたいです。ただ、こういうひどいゴーストが出るのは滅多にあることではないので影響は限定的です。

一方、このような稀なケース以外でも、明るい星などが視野内にあってその光の一部がフィルター表面などで反射して邪魔をしてくれることは頻繁に起きていました。例えば銀河団の中に<sup>\*31</sup>明るい星があると、その銀河団は常にその星に邪魔されるのです。困った。

このゴースト問題、私は昔から知ってはいたのですが、「明るい星のいる天域は極力撮らない」と積極的に逃げる消極的解決法を採り、観測提案

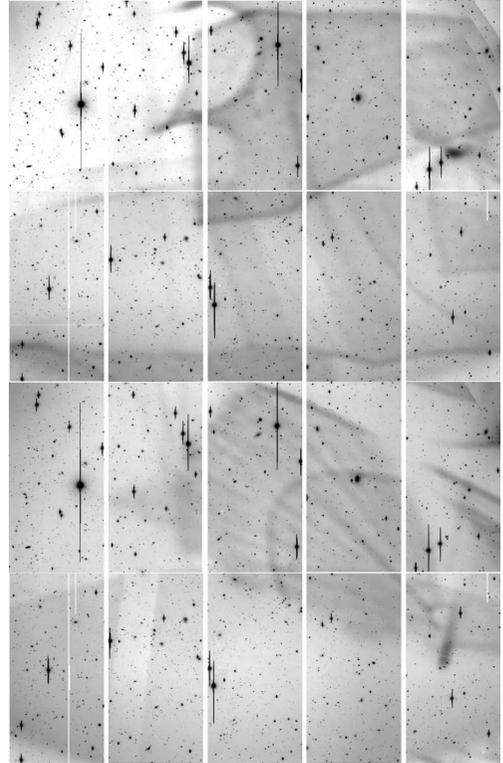


図10 視野の外にいる木星によるゴーストの例(ただし本当に木星のせいかどうかの検証はされていない). 同じ日に撮った同じ天域なのに、まるで違う構造が見えているので、星雲のような本物の天体ではないことがわかる。白黒反転。

を出す際にも、まずターゲット周辺で星のカatalogを確認して例えば8等より明るい星がいたらターゲットリストから外す、などで回避してきました。しかし、共同研究のしがらみもあって、次第にどうしても何とか対策せざるをえない状況に追い込まれていったのです。2014年くらいのことでした。その忌まわしきデータの一つを図11に示しました。まあ、実際にはこの天域ではなく、もう一つの天域でゴーストと目標天体の重要な構造が重なってしまっていたのがゴーストとの対決を決断した直接のきっかけではあるのですが。

<sup>\*31</sup> 正しくは、銀河団を見る方向の手前に銀河系内の明るい星が重なって見えている、の意。

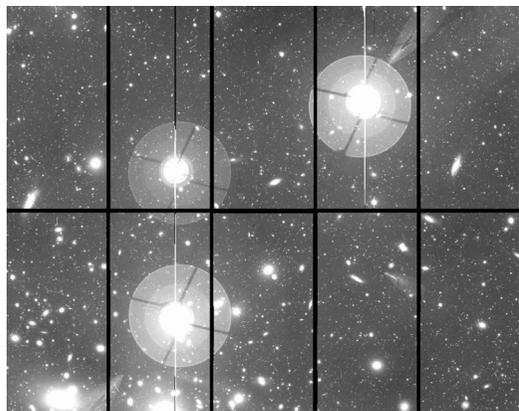


図11 とある銀河団の中心付近。明るい星三つの周辺のゴーストが派手派手しい。歪んだ十字形で暗くなっているのは主焦点を支えるスパイダーの影。

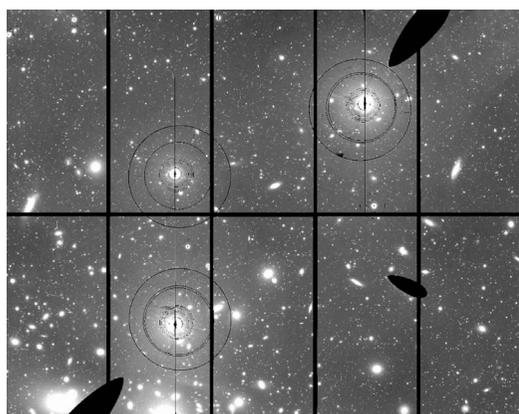
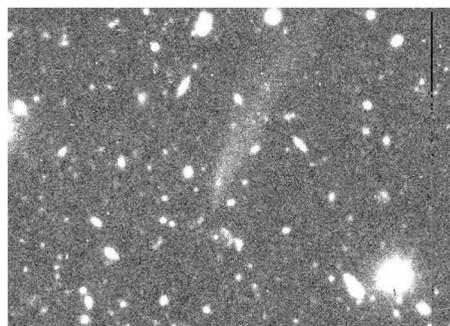
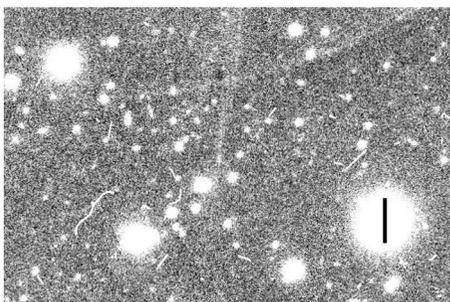


図12 星の座標を星のカタログから与えて半自動補正してみた結果。いつもいつでもうまくいく保証はない。鋭意開発改良中。

それから1年以上かかってゴーストをいろいろと調べていきました。観測の時に使っているフィルターによってゴーストの現れ方が違い、特に狭帯域と呼ばれる観測波長範囲の狭いフィルターでは多くのゴーストが出ること<sup>\*32</sup>、フィルターの厚みやフィルターのガラス材の組み合わせ方の違い



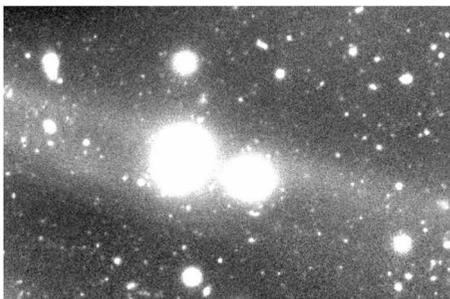
(a)



(b)



(c)



(d)

図13 ゴーストと本物の天体。(a) 本物。(b) 縦に走っているのは本物、右上から斜め下に走っているのはゴースト (c) ゴースト2種 (d) 本物。

<sup>\*32</sup> Suprime-Camの広帯域フィルターは色ガラスがベースとなっていて、迷光はフィルターを何回か通るうちに弱まってしまうのに対し、狭帯域フィルターは透明なガラスに薄膜を重ねて作られているためフィルターを通っても光の強さが弱まらず CCDまで届くのでした。ちなみにHSCのフィルターは大きさがすごく大きいので、もはや色ガラスでは作れず透明ガラスベースです。このため広帯域でもゴーストをよくみかけます。

でゴーストの現れ方の違いが説明できること、星の回りに見えているゴースト\*<sup>33</sup>は円形に見えるけど実はわずかに楕円で、中心も明るい星から視野中央に向かってズレていること（これは図11の右上や左下の星を見るとわかります）、視野中心を挟んで明るい星の対称の位置には伸びて歪んだ形のゴーストが出ること、などなど、細かい振る舞いが次第にわかってきました。そうやって積み上げた経験的な知識を元に「明るい星の位置情報を元にゴーストの位置を推測して、少なくとも明るい星の周辺部分は頑張って引き去る」というプログラムを作成し、未だ甚だ未完成ながら「ある程度は補正できる」ようになった結果が図12です。

こうして多くのゴーストを見て目を肥やした結果、ゴーストっぽいけど本物の天体と考えられるものをそれなりに自信をもって判別できるようになりました。紛らわしげな例を図13に示しましたが、変な天体を探すためには、天体ではない偽の形について知ることも大切な気がします。

## 6. 天上影は変わらねど

観測絡みの話をいくつか書いて参りましたが、最後に「ソフトウェア開発」に関しきくっと書かせていただきます。振り返ると、Suprime-Camデータを迅速に解析するための道具（解析ソフトウェア）を手元に揃え手入れしていたことが私にとって大きな支えになっていた気がします。道具は年々手になじむものでして、2010年代の観測では、観測中に撮ったデータを重ね合わせて測光原点を出すとかいうことを観測現場（山頂）で

10分くらいでできていました。これはデータオリエティシステム<sup>9)</sup>とは別物で完全に観測者環境で閉じたものです。簡易解析結果を元に、視野を多少ずらして面白い天体が入るようにするという現場での観測プランの動的調整も実際行なったりしていました。論文<sup>10)</sup>には書きませんでした。銀河団に落ちる銀河群から伸びる長い尾などはこの現場調整の結果発見できたものです。

私が使っているデータ解析ソフトウェアは、Suprime-Camのプロトタイプとも言うべきモザイク CCD カメラ1号2号のデータ解析ソフトウェア、正式名称「モザイク CCD データ解析ソフトウェア」通称「ねこソフト」<sup>11)</sup>、\*<sup>34</sup>を今もいじくり回し続けているものです。原型は1993年当時の諸先輩方が積み上げてきたプログラム群で、CとFORTRANのソースコードとcshスクリプト群から構成されていました。

当時私のいた研究室の計算機状態はかなり混沌としていました。（ここから専門用語が説明抜きで乱舞するので適宜ググりながら読んでください。）HP-UXと今は亡きSunOS4が混在する中、私がまず最初に使わせていただいたのが今は亡きSGI（シリコングラフィックス）の今は亡きIRIXのワークステーションでした。使い始めて1年くらい経った後、研究室の事情で私が使うワークステーションが今は亡きDECの今は亡きOSF/1に変更となります\*<sup>35</sup>。このOSF/1移住で苦労することになるのです。まず、Big EndianからLittle Endian\*<sup>36</sup>への変更ですが、これは元々のプログラムが両対応に書かれていたのでコンパイルオ

\*<sup>33</sup> 星の周りのゴーストは人によってはハロと呼んだりもします。

\*<sup>34</sup> <http://hikari.astron.s.u-tokyo.ac.jp/work/mosaic/man/>

\*<sup>35</sup> 当時、SDSSのソフトウェア開発は大混乱していて、それに振り回されかけた私は早々にSDSS界限から逃げてたりします。

\*<sup>36</sup> Big Endianは卵を太い側から割る流派、Little Endianは卵を細い側から割る流派です<sup>12)</sup>。というのが原義ですが、CPUなどの場合は、2バイトや4バイトの数をメモリにしまう際に上の桁が先に来るか下の桁が先に来るかの違いを指します。これはバイトオーダーと呼ばれ、Big EndianがSparc, Motorola, MIPS等、Little Endianがalpha, Intel等です。天文データの標準仕様FITSではBig Endianでデータを書き出すお約束なので<sup>13)</sup>、Intel系ではメモリからファイルに書き出す際とそれを読み込む際に、一々バイトの順序を入れ替える手間がかかってます。

プシオン変更で比較的簡単に済みます。問題は OSF/1 は当時まだ珍しかった 64 bit OS で long が 8 バイトだったため、sizeof(long)=4 を仮定して書かれていたソースコードが軒並みコケる羽目に陥ったことでした。なんで for を long で回すんだよー、とか言いながら（ただしそこは本質的ではない）ちくちくと int に書き換えていくこととなります。いや、最初は文字列置換で long を int に一気に書き換えようとしたんです。で、お約束というかなんというか、コメント中の along や belong まで変換されちゃったりとか、atol や ftell の返り値を int に代入しようとしちゃうとか、細々とした憂き目にあうわけです。この修正に加え、K&R と ANSI 混在から ANSI に統一しようと思論みます。K&R 流儀で関数中に char exit(); などが一々書かれてたりして、これが ANSI の void exit(int); と非互換。これらもチクチク潰していくこととなります。さらに、一部残っていた FORTRAN のコードも確か FORTRAN コンパイラをうまく通らなかつたことがあったからだったように記憶していますが、コードを解釈して ANSI C に書き直すという苦行も行うこととなります<sup>\*37</sup>。この辺り、20 年以上前の話なんで記憶が正しい保証は全くありませんが、ここである程度整理をしておいたおかげで、その後の Linux (x86) への移行もスムーズにいったような気がしています。なお、その後私が使い始めた Linux distribution が確か csh 系のシェルはデフォルトでは入れなかつたため、csh スクリプトも、sh (Bourne shell) に書き直してしまいました。当時は気づきませんでした。がメールを読み返すと、いくつか大変更を行ったことで結構軋轢を生んだようにも読めます。

さて、そんな ANSI C + sh 化したモザイク CCD データ解析ソフトウェア。Suprime-Cam のデータ解析への適用に際して私が新規に開発実装したのは、オーバースキャンと呼ばれる較正領域を使って CCD 読み出しの際の底上げ成分を補正するプログラム（プロトタイプのモザイク CCD カメラ 1 号 2 号の CCD ではオーバースキャンはありませんでした）、Suprime-Cam の焦点面での画像の歪みの補正、および、モザイクングの際の位置合わせプログラムの後段（過決定の方程式を解く部分）でした。過去のメールを読んでいると、歪み補正のパラメータ調整以外はファーストライトの年の夏頃までにそこそこ実装できていたようで、tar を展開して configure; make; make install の形にもなっていたようです。その後、実際の観測データを使って歪み補正のパラメータを調整したりとか、いろいろとバグ出しをしていました。

一方、公式の解析用プログラム (SDFRED)<sup>\*38</sup> の公開が 2004 年まで遅れたのは、ライセンスがはっきりしない既存外部プログラムコードをそのまま利用している箇所が天体検出の中にあつたためでした。内輪で使っている分にはともかく、この流用コードを全世界公開するのは懸念がありました。そこで、この部分のコードの独立実装を数年かかって行い、そこがある程度できた時点で公開可としたのでした。

SDFRED に関しては、その後「修正は 1 年くらいの間隔でしか行わない」というリリース方針に私が反発し、「最小限のプログラムソースコードは凍結して渡すので、それ使って好きにやってくださいませ。」という方向で私は徐々にドロップアウトします<sup>\*39</sup>。音楽性の違いならぬリリースポリシーの違いです。SDFRED にねこソフト

<sup>\*37</sup> FORTRAN 66 の算術 IF 文とかです。

<sup>\*38</sup> <https://www.naoj.org/Observing/Instruments/SCam/sdfred/index.html.ja>

<sup>\*39</sup> 「deep field に、このアルゴリズムはまずいだらう……」とかいう懸念も抱いてたんですが、私自身は deep field よく知らないんで強くは主張しませんでした。なお、ねこソフトは「混んでない領域でそれなりに明るい銀河をそれほど多くない露光数で観測して、形も明るさもそれなりの精度で測ることを対象に作られてました（あくまで個人の見解です）。

後継の一部しか含まれておらず、私の解析には SDFRED はほとんど使われていないのはこのためです<sup>\*40</sup>。私が見た主観的歴史は概ねそんな感じでしょうか。

ソフトウェアの話としては、このほか Suprime-Cam の制御ソフトウェア、およびデータ取得ソフトウェアの一部<sup>\*41</sup>のコードも私は書いたため、運用終了時に使われていたコードにも爪痕がかなり残ってたりしました。開発初期にメモリリークチェッカ `purify` を使ってメモリ周りのバグを枯らそうとした話とか、CGI ベースのステータスマニターとか、あるいはすばるの装置インターフェイス仕様との戦いやコマンド実装とか、色々書けそうなネタも思い浮かぶのですが、もう十分過ぎるほどだから長い記事になってしまっているので大人しく筆を置くことにします<sup>\*42</sup>。

## 7. さいごに

こうして昔を振り返りながら文章を推敲していると、途中で放置したままの案件が次々と思い出されて嫌な冷汗をかくものですね。今が夏でよかったですと思いました。

### 参考文献

- 1) 馬場肇, 他, 2002, 国立天文台報 6, 23
- 2) Miyazaki S., et al., 2002, PASJ 54, 833
- 3) Schacter D. L. (春日井晶子訳), 2004, なぜ「あれ」が思い出せなくなるのか—記憶と脳の7つの謎—(日本経済新聞社)

- 4) Clancy S. A. (林雅代訳), 2006, なぜ人はエイリアンに誘拐されたと思うのか(早川書房)
- 5) 吉川真, 山口智宏, 2011, スペースガード研究 3, 17
- 6) Yamaguchi T., et al., 2011, PASJ 63, 979
- 7) 家正則, 岩室史英, 舞原俊憲, 水本好彦, 吉田道利編, 2007, 宇宙の観測I—光・赤外天文学(日本評論社)
- 8) Yagi M., 2012, PASP 124, 1347
- 9) Furusawa H., et al., 2011, PASJ 63, S585
- 10) Yagi M., et al., 2017, ApJ 839, 65
- 11) 柏川伸成, 他, 1993, ねこでも使えるモザイク CCD データ解析ソフトマニュアル Ver 1.1 (東京)
- 12) Swift J., 1726, Travels into Several Remote Nations of the World, in Four Parts. By Lemuel Gulliver, First a Surgeon, and then a Captain of several Ships (London)
- 13) Pence W. D., et al., 2010, A&A 524, A42

### Several Anecdotes on My Suprime-Cam Observations & Analyses

Masafumi YAGI

National Astronomical Observatory of Japan,  
Division of Optical and Infrared Astronomy,  
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Several anecdotes about my Suprime-Cam observations and data analyses on keywords—comets and minor planets, nearby galaxies and galaxy clusters, ghosts and crosstalks, cosmic rays, and software development—are presented.

<sup>\*40</sup> ねこソフトにはない機能、例えば Suprime-Cam 画像から FOCAS の preimaging 画像をシミュレートする機能などはありがたく使ったりします。

<sup>\*41</sup> 例えば CCD を読み出して、計算機の名前付きパイプ (FIFO) にデータが送られてきてから、ばらして並べて揃えて FITS ヘッダをつけてアーカイブに送るまでなどです。

<sup>\*42</sup> キーボード打ってる場合も筆を置くという表現でいいのかわかりません。