

すばる望遠鏡公開データアーカイブシステムの開発 6

野田祥代, 古荘玲子¹, 古澤順子, 山田善彦, 山内千里,
小澤友彦², 高田唯史, 市川伸一

(2011年11月14日受付; 2012年1月10日受理)

Development of Public Science Archive System of Subaru Telescope 6

Sachiyo NODA, Reiko FURUSHO¹, Junko FURUSAWA, Yoshihiko YAMADA, Chisato YAMAUCHI,
Tomohiko OZAWA², Tadafumi TAKATA, and Shin-ichi ICHIKAWA

Abstract

We report various improvement in the public science archive system, SMOKA (Subaru-Mitaka-Okayama-Kiso Archive system). We have reconstructed the new "Minor Bodies Search" to search observational data of minor bodies such as comets and minor planets in the solar system. We developed the new User Interface of the overlapped area search for archived frames obtained by the Subaru Suprime-Cam and Kiso 2kCCD. Astrometric calibrations of KISO 1kCCD and 2kCCD have been done. The observational data from new instruments, Okayama ISLE, KOOLS, Hiroshima HOWPol, Subaru HiCIAO, and FMOS have been released from SMOKA.

要旨

天文データアーカイブシステム SMOKA (Subaru-Mitaka-Okayama-Kiso Archive system) に様々な改良を加えたので報告する。太陽系内の彗星や小惑星を対象とした“移動天体検索”機能の再構築を行った。また、すばる望遠鏡の Suprime-Cam および木曾観測所の 2kCCD のアーカイブデータを対象とした重複領域検索のユーザインタフェースの開発と、木曾観測所の 1kCCD, 2kCCD に対する位置較正を行った。岡山天体物理観測所の観測装置である ISLE, KOOLS, 東広島天文台の観測装置である HOWPol, すばる望遠鏡の HiCIAO および FMOS のデータを SMOKA に組み入れ、公開を開始した。

1. はじめに

天文学は観測を軸とした学問である。したがって観測データは必要不可欠な研究の基盤であり、ある時刻の二度と再現しない宇宙の情報を記録した、極めて貴重なものである。それらを散逸しないよう収集、整理、保存し、データの効率的な利用に不可欠な検索サービスと共に、再解析や統計的研究といった再利用を行う利用者に提供するのが、データアーカイブシステム

の重要な使命である。地上における天文観測では、天候などの観測条件に恵まれなければ良質な観測データを得ることができない。加えて、近年、観測装置の高度化にともない生産される観測データ量が増大する一方、プロジェクトの大型化により、一研究者がこれらの観測装置を直接利用して目的の天体を希望の時刻に観測することは難しくなっている。こうした情勢の中、天文データアーカイブの利用価値はこれまで以上に高くなり、今後も天文学の発展においてますます需要・重要性ともに高まることを我々は論文 1), 2), 3), 4), 5) (以下論文 1, 論文 2, 論文 3, 論文 4, 論文 5) において述べてきた。

^{*1} 聖心女子大学 University of the Sacred Heart, Tokyo

^{*2} みさと天文台 Misato Observatory

世界的にも、大型観測装置で取得された観測データはアーカイブを通して広く研究者や教育者に公開されるようになってきている。例えば、Hubble Space Telescope (HST)^{*1}では、プロジェクト初期の1993年の段階でデータアーカイブシステムが構築され⁶⁾、データを研究者に公開した。その後も、NASA/IPAC Infrared Science Archive (IRSA)⁷⁾、VizieR⁸⁾、AKARI Catalog Archive Server (AKARI-CAS)⁹⁾など、いずれも観測データおよび検索サービスを公開し、研究者にとって使いやすいシステムとなるよう、それぞれ工夫がなされている。

このような中、我々は、国立天文台のハワイ観測所のすばる望遠鏡^{*2}、岡山天体物理観測所 188cm 望遠鏡^{*3}、東京大学木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡^{*4}、東広島天文台のかなた望遠鏡^{*5}、MITSuME望遠鏡¹⁰⁾の観測データを管理保管し利用者に供するアーカイブシステム SMOKA (Subaru-Mitaka-Okayama-Kiso Archive system)^{*6}を開発し運用を行ってきた(論文1, 論文2, 論文3, 論文4, 論文5)。SMOKAを通して、観測者(観測プロポーザル採択者)以外の研究者も、観測所が定めた占有期間を過ぎた観測データを検索・取得し、自身の目的達成のために活用することができる。実際、SMOKAの利用者は年々増加し、SMOKAを利用した研究論文も90本を超えるなど、SMOKAは日本における光赤外観測データのアーカイブシステムとして、国内外の研究者に認知されている。

利用者の増加に伴い、研究分野や利用目的、利用方法も多岐に渡る。様々な要望をもつ利用者が、平易に、なおかつ効率良く観測データを取得できるよう、我々は、これまで、基本となるシンプル検索、アドバンスド検索の他に、すばる望遠鏡のSuprime-Cam 11)のデータに特化したSuprime-Cam専用検索、観測所と年月を指定して検索するカレンダー検索、FITSヘッダ内のキーワード、値およびコメント文を検索する全項目検索および全文検索などの検索機能を開発し実装してきた。論文5では、長年開発が望まれてきた重複領域検索機能を開発し、Suprime-Camデータに対して複数回観測されたフレームを検索可能であることを実証した。また、すばる望遠鏡の望遠鏡オペレータが

日々の観測の概略を記録したサミットログから文字列を検索することも可能となった。

以上のように我々は、科学的成果を得るために必要と思われる多彩な検索機能を開発しその定常運用に努めてきたが、さらに効果的かつ積極的に天文学の発展に寄与していくためには、より多角的なデータアーカイブ利用を促進するための開発・改良が必要である。SMOKAは2001年6月の運用開始から10年が経過し、2011年現在で約460万フレームの観測データを保持している。我々は、これまで主に太陽系外の天体の検索機能を開発してきたが、こうした膨大なフレームには、当然、太陽系内の天体(移動天体)も多数写りこんでいることが期待される。時間とともに天球上を移動する小惑星や彗星といった太陽系移動天体の研究では、軌道要素を精度良く決定したり、光度変化や空間分布を調べることが重要であり、そのためにはより多くの観測データが必要である。しかし、実際には、特に光度の低い天体や、周期の長い移動天体のフォロー観測は十分とはいえない現状である。したがって、アーカイブデータから過去の天体情報を調査することは非常に意義のあることであり、こうした背景から、SMOKAでは過去に移動天体検索機能の開発を行い、2003年1月より運用を開始した(論文2)。しかしながら、以下に示すような問題があり、2006年5月以降、運用を休止している。

- (1) Suprime-Camの観測フレームに高精度の位置較正が施されていないため、移動天体の位置を観測フレーム上で正確に特定することができなかった。
- (2) 検索に時間がかかった。
- (3) 効率的な更新作業を行うのが困難であった。

特に(3)の理由から、前移動天体検索システムは定常運用に至らず、また計算機更新の際の技術的な問題も絡んだため、運用継続が不能となった。そこで我々は、前回のシステムにとらわれず、定常運用可能な移動天体検索システムを新たに構築することとした。Suprime-Cam(すばる望遠鏡)は10枚のCCDチップで構成されており、1ショット(露出)で10フレームのデータが生成されるモザイクカメラである。SMOKAで現在公開している23観測装置データの中でも、観測視野が 34×27 分角と広く、こうした観測フレームには小惑星や彗星といった太陽系移動天体が多数写っていることが期待できる。また、Suprime-Camデータには既に位置較正が施された観測フレームがあり¹²⁾、これらは、全天を等面積に分割する手法の1

*1 <http://www.stsci.edu/hst/>

*2 <http://subarutelescope.org/index.html>

*3 <http://www.oao.nao.ac.jp/>

*4 <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/index.html>

*5 <http://hasc.hiroshima-u.ac.jp/telescope/kanatatel-e.html>

*6 <http://smoka.nao.ac.jp/>

つであるHEALPix (Hierarchical Equal Area and iso-Latitude Pixelization) 空間分割法^{*7} 13) を用いて、各フレームに含まれる天域を数値化した位置データ (HEALPix インデックス) を使ってデータベース化されている (論文 5)。HEALPix インデックスが登録してあるデータベースを参照することで、各観測フレームの位置と移動天体との位置を 1 秒角という高精度で比較することが可能である。以上の理由から、今回我々は本システムを構築するにあたり、対象とする最初のデータを Suprime-Cam による観測データとした。

その他の求められていた開発および改良点として、論文 5 で開発した重複領域検索機能では、公開に向けてのユーザインタフェースの開発が課題として残っていた。木曾観測所の 1kCCD 14), 2kCCD 15) といった撮像観測装置^{*8} による観測データは、広視野のため観測目的以外の天体を多く含んでおり、データの徹底的な再利用という面でも利用価値の高いデータである。しかし、これらのヘッダに記された位置情報は精度が低く、利用促進のためには位置精度を高めることが必要であった。また、アーカイブという意義からも SMOKA を介してより多くの観測装置のデータを公開することが望ましく、岡山天体物理観測所の ISLE 16), KOOLS 17), 18), 東広島天文台の HOWPOL 19), すばる望遠鏡の HiCIAO 20), 21), 22), 23) FMOS 24), といった新規装置のデータの組み込みも重要な課題であった。

本論文では、以上のような課題を解決すべく開発、追加補強した機能について論ずる。2 章では、HEALPix インデックスを利用した移動天体検索機能の開発について論じる。3 章で、重複領域検索機能の実装について述べる。4 章では、木曾観測所の観測装置である 1kCCD と 2kCCD データの位置較正について概説する。新観測装置データの組み込みと、追加補強された機能については 5 章で、SMOKA の運用状況と科学的成果については 6 章で述べ、7 章でまとめを行う。

2. 移動天体検索機能の開発

本章では、すばる望遠鏡 Suprime-Cam の観測データを対象として、既知の彗星および天体番号が確定している小惑星に対する移動天体検索機能の開発について述べる。

^{*7} <http://healpix.jpl.nasa.gov/>

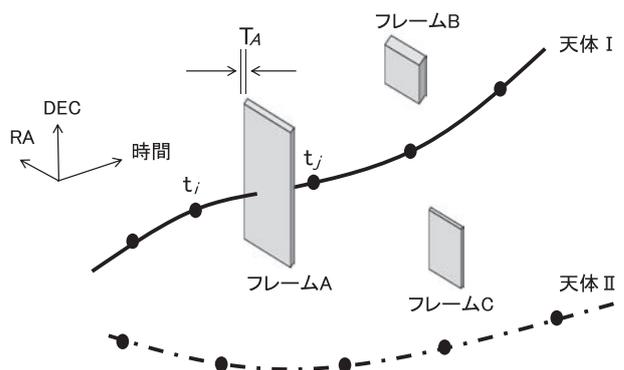
^{*8} http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/INSTRUMENTS/instruments_e.html

2.1 新しい移動天体検索の基本方針

小惑星や彗星といった太陽系移動天体は、時間とともに天球上の位置が変化する。このような天体をアーカイブデータから検索するためには、図 1 で示すように、移動天体と観測フレームの天球上の位置 (赤経・赤緯)、および時刻のパラメータ空間における比較を行い、そのうち、観測フレームと移動天体とが交点を持つような組み合わせを検出する必要がある。

論文 2 で開発した移動天体検索には、1 章で述べたように様々な問題があった。そのうち、検索に時間がかかるという問題点の原因は、図 1 で示した検出に必要なすべての計算を、利用者が検索する際に実行していたことであった。この問題を解決するため、新しい移動天体検索システムでは、検索の基本方針として 2 つの工夫を取り入れた。

まず 1 つ目は、アーカイブデータに該当データが存在しない期間の位置推算を最小化するという工夫である。移動天体の位置情報は、軌道要素をもとに位置推算により得られるが、何十万個という天体すべてについて、検索され得ないものまで行うのは時間がかかるだけでなく、結果を保存する場合にはディスク領域が逼迫するなどして無駄が多い。こうした非効率を避けるため、我々は移動天体の位置推算を 2 つのステップ、[1] 時間ステップを 1 日としたラフ計算 (図 1 の黒丸)、[2] 細かい時間ステップで行う詳細計算、に分割した。



● 1日おきの位置推算による天体位置

図 1: 本移動天体検索システムの概念図。移動天体の検索では、天体の軌跡が観測フレームを突き抜けるような場合を検索する。本システムでは、天体の位置推算を 2 段階に分けて行う。実線と点線は天体の軌跡を、黒丸は一日おきのラフ計算を表す。天体 I はラフ計算の t_i , t_j 間でフレーム A を横切る。この場合、天体 I はフレーム A の露出期間 (T_A) に限って詳細計算を行う。天体 II のように、どのフレームとも接点のない天体は詳細計算を行わない。

具体的には、ラフ計算の結果とデータアーカイブの観測データとの関係とを解析し、移動天体が写っている可能性のある天体と観測フレームIDの組み合わせを求め、そこで検出したものについて必要な期間(図1のTA)のみ詳細計算を行って、厳密な解を求める方法をとった。

2つ目の工夫は、上記の「ラフ計算」「詳細計算」の計算結果を静的にデータベーステーブルに持たせる事である。これにより、利用者が検索する際には移動天体検索用テーブルを検索する時間と、表示のためのフォーマットの時間しかかからないため、高速で利用者に結果を返すことが期待できる。

以上の基本方針を図2にまとめる。こうした工夫により、前移動天体検索では10秒弱かかっていた検索時間が、本システムでは2~3秒と、利用者をほとんど待たせることなく結果を表示させることが可能となっている。

2.2 システムの概要

今回開発した移動天体検索システムの概略は図3のとおりである。2.1節で述べた基本方針を使いつつ、移動天体情報の追加・更新とSMOKAが所蔵する観測フレームの追加・更新を検索結果に反映させるために、2つのサブシステム(「検索システム」「管理・更新システム」)を持つシステムとした。

「検索システム」は、計算済みの結果を持つ移動天体検索用テーブルを検索して、利用者の検索要求に即座に応答する部分であり、「管理・更新システム」は、NASAのJet Propulsion Laboratoryが提供するHORIZONSシステム(以下、JPL/HORIZONS)^{*9}が提供する移動天体情報・位置推算情報、およびSMOKAが持つアーカイブデータの管理情報をもとに、「検索システム」で使う移動天体検索用テーブルを定期的に更新する役割をはたす。

*9 <http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>

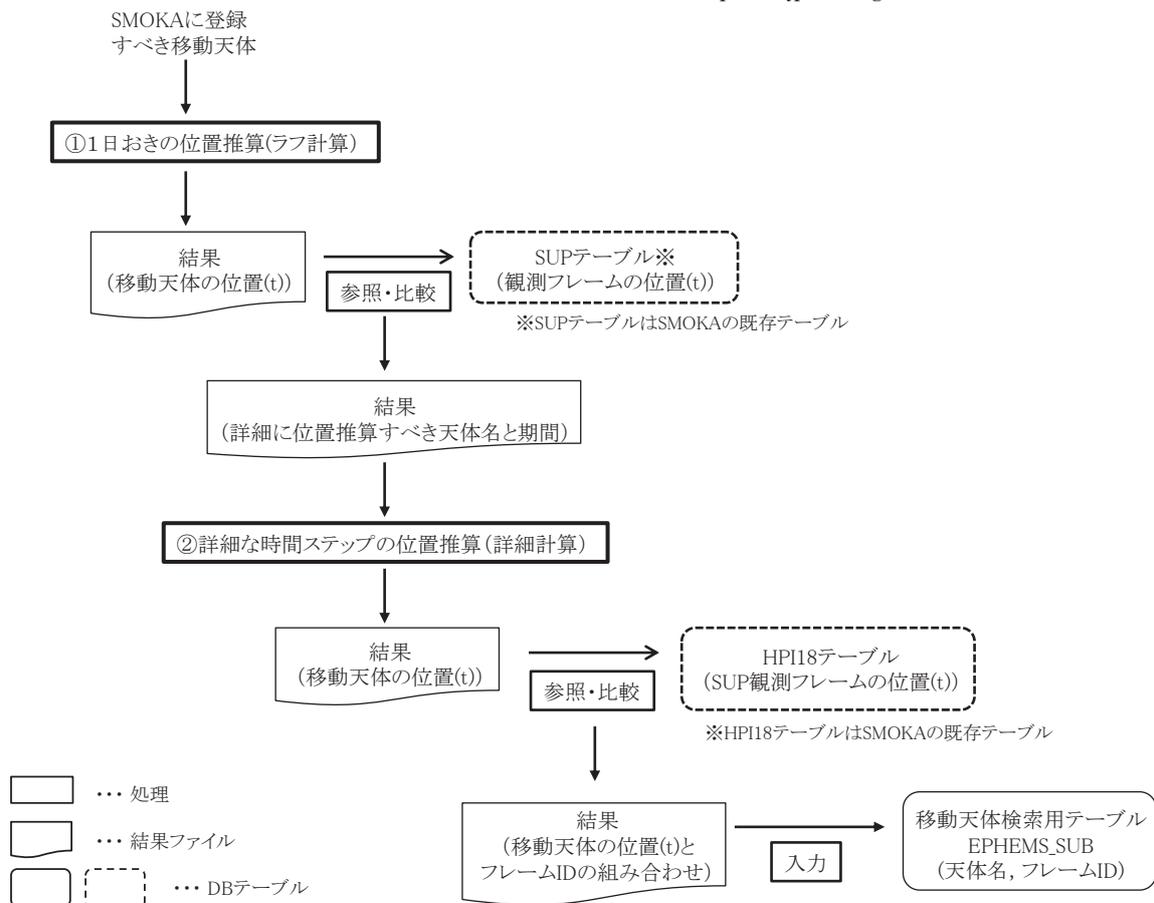


図2：新しい移動天体検索の基本方針。まず、登録すべき天体に対して、ラフな位置推算(①)を行って、結果として得られる天体位置とアーカイブデータの観測フレームとの位置関係を解析する。さらに詳細な位置推算が必要であると判定した天体についてのみ、詳細な時間ステップで位置推算(②)を行う。さらに、天体の位置と観測フレームの詳細な位置情報とを比較して、天体と観測フレームの組み合わせを求め、結果を移動天体検索用テーブルに入力する。図中のSUPテーブルとHPI18はSMOKAの既存テーブル(2.3.2節 図5参照)である。

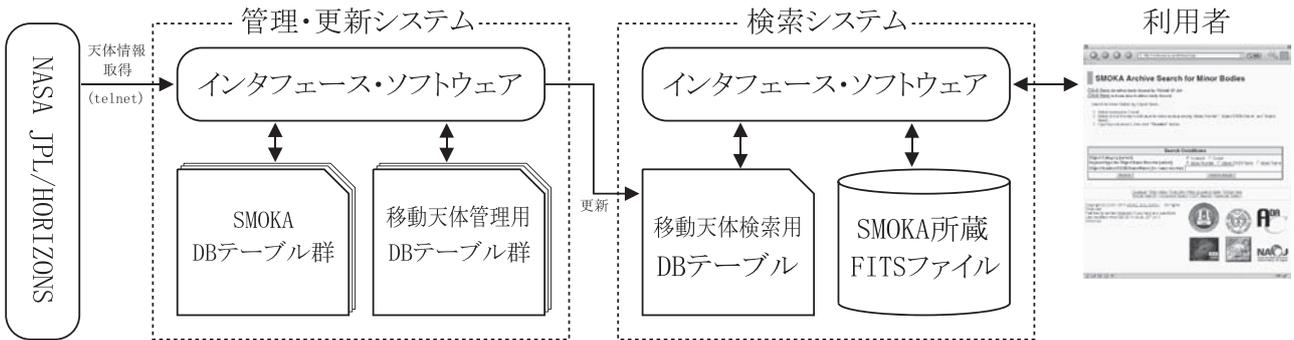


図 3：移動天体検索システムの概略図。本システムは、「検索システム」「管理・更新システム」の 2 つのサブシステムに大別できる。いずれもテーブルとインタフェース・ソフトウェアから構成される。「検索システム」は、利用者が検索する際に直接応答する部分で、テーブルとして予め SMOKA で計算した結果を保持している。「管理・更新システム」は、「検索システム」で使う移動天体検索用テーブルを定期的に更新するためのシステムであり、テーブルとして、移動天体を管理するためのテーブル群と SMOKA 既存のテーブル群がある。

本システムは、図 3 のとおりテーブルとインタフェース・ソフトウェアで構成するが、テーブルには最大のもので約 1 億行を扱うものがある事から、SMOKA の他の検索機能と同様、リレーショナルデータベース管理システム (RDBMS) を利用している。RDBMS は、Sybase 15.0 である。インタフェース部分は SMOKA の他のソフトウェアに合わせて主に Java を使用している。

次節から、JPL/HORIZONS からの移動天体情報の取得に関する部分や、RDBMS のテーブル設計、ユーザインタフェースの設計、運用手順などについての詳細を述べる。

2.3 システムの詳細

2.3.1 JPL/HORIZONS による位置推算

論文 2 で開発した移動天体検索機能では、SMOKA 自前の位置推算プログラムで計算を行っていた。しかしながら、太陽との 2 体問題に近似していたため、誤差が数分角に及んでしまう場合が生じた。より精度の高い位置推算を行うには惑星の影響を考慮した多体問題として扱う必要があるが、この計算には短時間で計算できるプログラムと、軌道要素データの入手および更新が必要である。今回新たに開発した移動天体検索機能では、この点を解決すべく、位置推算部分は外部システムに委ね、簡便に高精度の位置推算を実現することとした。

位置推算の既存システムとして我々が着目したのは、軌道要素データベースの大元である Minor Planet Center (MPC) ^{*10} と、NASA の JPL/HORIZONS

である。MPC の位置推算の入手方法は WEB インタフェースであるが、大量の移動天体の位置推算結果を自動で取得するための十分な機能がない。一方、JPL/HORIZONS では、telnet, Mail, Web の各インタフェースが用意されており、特に、Telnet インタフェースを利用することにより複数天体の位置推算の自動化が可能である。したがって、我々は、JPL/HORIZONS の Telnet インタフェースを採用することとした。

JPL/HORIZONS では、天体名や仮符号、天体番号などを入力すると、その軌道要素を含めた天体情報と位置推算結果を取得することができる。何十万個もの移動天体の位置推算を自動化するために、我々は Perl の Telnet モジュールを使用したプログラムを作成した。同時に、エラー処理の省力化のために、何らかのエラーが起きた場合に一旦プログラムを終了し、再度 Telnet 接続をやり直した後、その天体について再計算する工夫を施した。

小惑星や彗星といった移動天体は、発見されるとまず暫定的な名称である仮符号が与えられ、その後天体名や天体番号がつく。移動天体検索において、利用者が天体名、仮符号、天体番号のいずれでも検索可能とするために、我々は CODE とよぶ SMOKA 独自の天体識別名を考案した。CODE は、表 1 に示すように 1 桁の CLASS,

天体名	CLASS	仮符号 (12 桁)	天体番号 (7 桁)
Ryoma	A	1982 WF_____	...2835
Mueller 1	N	1P_____	..900001

表 1：CODE の構成。1 桁の天体種別を表すアルファベット、12 桁の仮符号部分、7 桁の天体番号部分からなる。左端に天体名を示す。中段は小惑星 "Ryoma"、下段は彗星 "Mueller 1" の CODE の例である。

*10 <http://www.minorplanetcenter.net/>

12桁の仮符号, 7桁の天体番号を結合して構成する. CLASSは小惑星にはA, 彗星にはP, D, C, Nのいずれかを割り当てる. 例えば, 小惑星"Ryoma"のCODEは"A1982_WF_____2835"と表現する. AはAsteroidを表す天体識別記号で, 次の"1982_WF_____"は仮符号, "___2835"は天体番号である. 先に述べたように, SMOKAではNASAのJPL/HORIZONSの移動天体情報(天体名, 仮符号, 天体番号, 軌道要素など)を利用しており, CODEはこの情報を元に作成している.

彗星の場合, JPL/HORIZONSの天体リストには同一の天体名, 仮符号でありながら, 複数のEPOCHデータが登録されている場合がある(小惑星の場合は単に上書き更新される). 例えば, "Halley"では, 仮符号1P, 天体名Halleyのものが33個存在する. 作業の複雑化を避けるため, SMOKAではこれらを別CODEとして扱う. したがって, 彗星の場合に限り, CODEの天体番号には例えば, "_900001", "_900002"など, 天体番号の代わりにJPL独自の通し番号を利用して別CODEを作成し天体を区別する. また, CLASSも, 同じく天体リスト内から取得するが, それぞれ彗星の命名規則^{*11}より, P(Periodic)は周期彗星, D(Dead)は周期彗星であったが今は存在しないか消滅した彗星, C(Comet)は周期彗星でない彗星を表している. 特にPのうち天体番号が確定しているものは便宜上, NというCLASSを割り当てることとした.

小惑星のうち天体番号が確定している天体は, 2011年11月現在で約30万天体である. 一方, 天体番号

*11 <http://www.cbat.eps.harvard.edu/cometnameg.html>

ラフテーブル
(EPHEMR_Xxx)

カラム名	CODE	EPOCH	T_ROUGH	MJD_ROUGH	OBSERVATORY	RA	DEC	RASEC	DECSEC	RA_ERR	DEC_ERR
説明	天体CODE	元期(MJD)	位置推算の時刻	T_ROUGHのMJD変換値	観測所名	赤経	赤緯	赤経[sec]	赤緯[sec]	赤経誤差	赤緯誤差

名前解決テーブル (MBNAME)

カラム名	CODE	CLASS	DSGN	NUM	ONAME	SNAME	EPOCH	RTABLENAME
説明	天体CODE	天体種別	仮符号	天体番号	天体名	検索用天体名	元期(yyyy)	ラフテーブル名

移動天体検索用テーブル
(EPHEMS_SUB)

カラム名	CODE	EPOCH	T_DETAIL	MJD_DETAIL	RA	DEC	RASEC	DECSEC	RA_ERR	DEC_ERR	HPL18	FRAME_ID
説明	天体CODE	元期(MJD)	詳細計算の日付	T_DETAILのMJD変換値	赤経	赤緯	赤経	赤緯	赤経誤差	赤緯誤差	HEALPix インデックス (18階層)	フレームID

観測フレーム時間情報テーブル
(DOEXP)

カラム名	FRAME_ID	DATE_OBS	MJD_DATEOBS	MJD_STR	MJD_END
説明	フレームID	観測日	観測時刻(MJD)	観測開始時刻(MJD)	観測終了時刻(MJD)

図4: 移動天体検索機能の実現のために, 新たに作成した各テーブルの構造. ラフテーブル名のXは, 小惑星にはA, 彗星にはCを割り当て, xxは01, 02, ...などの数字を表す. 現在, A01からA15までと, C01を使用している. 名前解決テーブルと移動天体検索用テーブルのみ, 利用者が検索する際に使用する.

が確定していない天体は, 約26万天体あるが, 2.3.4節で述べるSMOKAでのデータ更新の際には, 新たに発見された小惑星を追加するだけでなく, 観測が増えたなどの理由で軌道要素が更新された天体を検知して, 新たに位置推算をやり直す処理が必要となる. また, 天体番号が確定した場合にはCODEも変更となるため, 以前のCODEで処理したSMOKA側の結果を全てのテーブルから削除した上で, 新規に登録しなおす手順が必要となるなど, 2.3.4節で述べる天体番号が確定している天体のデータ更新とは別の処理が発生する. データ更新手順確立の第一段階として, 我々は现阶段では天体番号が確定した小惑星のみを検索対象とした. 彗星については, その時点でJPL/HORIZONSが保持している全ての天体を検索対象とした. その理由は, 2.3.4節でも述べるが天体数が4000個程度であるため, 定期的に全彗星に対してCODEの再作成およびラフ計算の再計算など一連の処理を最初から行うことが可能だからである.

2.3.2 テーブル設計

図4に, 移動天体検索機能実現のために作成したテーブル群を示す. 各テーブルの内容は以下の通りである.

(1) ラフテーブル (EPHEMR_Xxx)

1日おきの位置推算結果を記録するテーブル. 現在, ラフテーブルに登録されている天体は, 小惑星約30万天体, 彗星約4000天体で, 1天体あたり約4900日分(Suprime-Camの位置較正処理が行われた, また行われる予定の期間)の計算結果を登録しており, 行数が膨大になるため, 2万天体ずつ複数の小さなテーブル(Xxx, 以下, 子テーブル)に分割して登録して

いる。各子テーブルは約 1 億行である。

(2) 名前解決テーブル (MBNAME)

CODEと天体名、仮符号、天体番号を結びつけるテーブル。また、天体が登録されているラフテーブルの子テーブルの名前 (Xxx) も、このテーブルの RTABLENAME というカラムから取得できる。行数は、登録天体数と同じ (約 30 万天体) である。

(3) 移動天体検索性用テーブル (EPHEMS_SUB)

検索時の時間短縮のため、予め移動天体の詳細計算結果と Suprime-Cam の観測フレームとの照合を行った結果を記録するテーブル。現在、約 2 万 6 千天体が登録されており、そのうち約 4 千天体について対応するフレーム ID も登録されている。

(4) 観測フレーム時刻情報テーブル (DOEXP)

Suprime-Cam の諸データが格納されている運用テーブル (SUP) から時刻情報だけを抽出したテーブル。UT_ENDのみ、SUPテーブルの観測開始時刻 (UT_STR) と露出時間 (EXPTIME) から算出して登録している。

利用者が検索する際には、(2) 名前解決テーブルと (3) 検索テーブルのみ参照する (図 3 の検索システム)。その他、観測フレームに含まれる HEALPix インデックスを記録したテーブル (以下、HPI18, 論文 5 のテーブル 1), SUPテーブルといった SMOKA 既存のテーブル (図 5) も併せて使用する。(2), (3) 以外は、この 2 つのテーブルを作成するためのテーブル群である (図 3 の管理・更新システム)。(1) のラフテーブル (子テーブル) は、1 テーブルあたり約 1 億行の巨大なもので、2011 年 11 月現在は 16 テーブルあり、今後も新たな天体の登録に比例して当然増大していく。SMOKA の利用者向けサーバーに負荷をかけないため、我々は、図 3 の管理・更新システムをデータ処理用のデータベース上に作成し、実際の検索に必要な (5) 移動天体検索性用テーブルと (6) 名前解決テーブルを作成した後、これら 2 テーブルを検索システムとして SMOKA の利用者向けサーバーにコピーして実装するという方法をとることとした。

図 6 は、「移動天体検索性用テーブル (EPHEMS_SUB)」を作成する手順である。以下でその流れを概説する。実際の運用にはワークシートを利用し、各手順を確認しながら作業を進めている。また、主な作業にか

HPI18テーブル (HPI18)

カラム名	FRAME_ID	HPI18	Nstep
説明	フレームID	HEALPix インデックス	HEALPix階層

SUPテーブル (SUP)

カラム名	FRAME_ID	...	EXPTIME	MJD	RASEC	DECSEC
説明	フレームID	露出時間	観測日時	赤経	赤緯

図 5：移動天体検索性機能で使用する SMOKA の既存テーブルの構造。どちらも SMOKA の運用サーバに展開されているテーブルである。SUPテーブルでは 45 カラムを省略している。

処理内容	1 天体あたりにかかる時間 [秒]	天体数	かかる時間 [分]
③ラフ計算 (JPL: 1 日毎 4902 日分)	4	2000	133
④成形	0.3	2000	10
⑥ラフテーブル入力 (bcp)	0.5	2000	17
⑦詳細計算が必要な天体に絞る	7	2000	233
⑧詳細計算 (JPL)	15	180	45
⑨成形	4	180	12
⑩検索テーブル入力 (bcp)	0.4	180	1
⑪フレーム ID 検索	20	180	60
合計			511 分 (8.5 時間)

表 2：新たに小惑星 2000 天体の登録をする場合の作業時間見積り。ほぼ一瞬で処理が終わる項目は省略している。最短作業時間は約 8.5 時間と見積もられる。

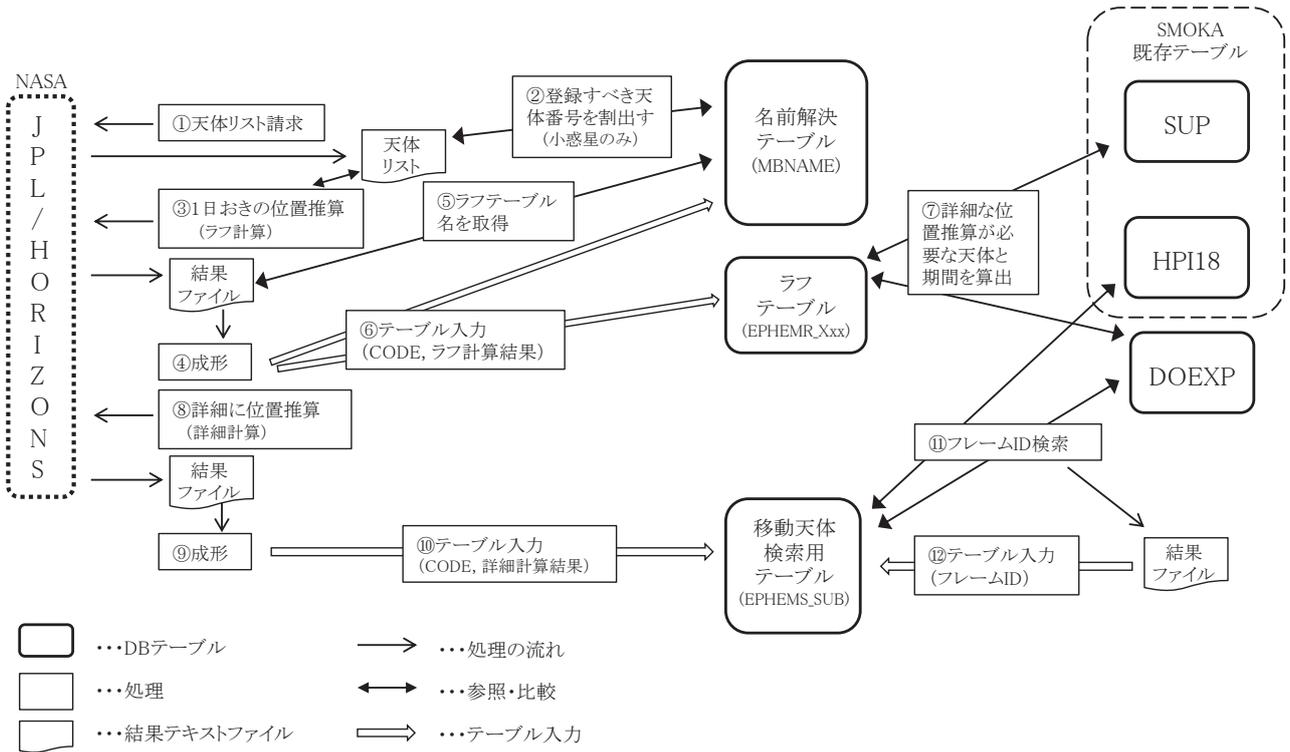


図 6：移動天体検索用テーブルを作成する作業手順 (①～⑫)。位置推算は登録すべき天体に対して JPL/HORIZONS で行う。追加すべき小惑星は、手順①、②で見出す。彗星については②を行わず、①で取得した天体リストにある天体全てについて③以降の処理を行う。新たに SMOKA で位置較正フレームが追加された場合は、手順⑦で参照する SUP テーブルを、SUP テーブルから追加すべき天体だけの情報を抽出したテーブル (SUP_MB_WCS) に差し換えて以下同様の作業を行う。

かる時間を、新たに小惑星 2000 天体の登録をする場合を例にして表 2 にまとめる。ほぼ一瞬にして処理が終わる作業は、表 2 では省略した。使用した計算機は、FUJITSU PRIMEPOWER 450 (CPU : SPARC64V (2GHz) × 4, Memory : 8GB, 以下 FUJITSU P450) である。

図 6 において、彗星の場合は①で天体リストを取得し、そのリストをもとに③のラフ計算を行う (②は実行しない)。一方、小惑星の場合には、新たに天体番号が確定した天体を追加する手順として①と②を実行する (詳細は 2.3.4 節)。次に、登録すべき天体について 1 日おきのラフな位置推算を行う (図 6 ③)。計算時刻は 0 時 [UT] とした。計算期間は 1999 年 8 月 1 日から 2012 年 12 月 31 日の約 4900 日と、Suprime-Cam の位置較正処理が行われた、あるいは今後行われる予定の期間を十分にカバーする期間としている。ラフ計算結果は、天体ごとに軌道要素などの天体情報と位置推算結果がテキストファイルで得られる。それらを成形し (図 6 ④)、登録すべきラフテーブルの子テーブル名 (Xxx) を取得 (図 6 ⑤) した後、子テーブルと名前解決テーブルに登録する (図 6 ⑥)。

次に、ラフ計算の結果と SUP テーブルを照合し

て、細かい時間間隔での位置推算が必要な天体を絞り込む (図 6 ⑦)。具体的な手順は以下の通りである。Suprime-Cam の 1 ショットの中心座標を (RA, DEC)、観測視野を FOV (Suprime-Cam では 1800 秒角)、観測当日の 0 時 [UT]、翌日 0 時 [UT] での天体位置をそれぞれ (a_1, δ_1) , (a_2, δ_2) とし、

$$a_1 - \text{FOV} < \text{RA} < a_2 + \text{FOV}$$

$$\delta_1 - \text{FOV} < \text{DEC} < \delta_2 + \text{FOV}$$

$$a_1 < a_2, \delta_1 < \delta_2$$
 となるようなショットと天体との組み合わせを検索する。この条件は確実に天体を検索するためのものであり、今後は検索の効率化のため、さらに条件を狭くすることを検討している。この絞り込みにより、詳細計算を行う必要がある天体は全体の約 9% となる。

詳細計算 (図 6 ⑧) もラフ計算と同様、JPL/HORIZONS システムを利用する。計算期間は図 6 ⑦の結果得られた、対応するショットの露出開始から露出終了までの時間である。彗星についてはすべて 1 秒間隔での詳細計算を行うが、小惑星の場合、軌道はほぼ確定しているとして、天体の軌道短半径 b [天文単位] により以下のように分類し、不必要に詳細な計算を省いた。すなわち、軌道上での移動速度はケプラーの法則より
$$V = (GM/b \times ((1 + e)^3 / (1 - e)))^{\frac{1}{2}}$$

ただし G : 重力定数, M : 太陽質量, e : 離心率
 また, 近日点距離は
 $q = b \times ((1 - e)/(1 + e))^{\frac{1}{2}}$
 であり, 99.7%の小惑星では $e \leq 0.4$ であることから,
 $e = 0.4$ とすると
 $b = 2$ のとき, $V = 30.8 \text{ kms}^{-1}$, $q = 1.31$
 $b = 5$ のとき, $V = 19.5 \text{ kms}^{-1}$, $q = 3.27$
 となる. 地上から観測する際, これらの天体が 1 秒角
 移動するのにかかる時間は最速で $b = 2$ の天体は約 7
 秒, $b = 5$ の天体は約 85 秒である. そこで, 我々は,
 b が 2 以下の天体では詳細計算の時間ステップを 1 秒
 毎とし, $2 < b < 5$ では 10 秒毎, $b \geq 5$ では 30 秒
 毎とした. 現在 SMOKA に登録している小惑星約 30
 万天体の 9 割以上が $2 < b < 5$ である.

次に, 詳細計算結果を成形して (図 6 ⑨), 検索
 テーブルに登録する (図 6 ⑩). さらに, 各天体が含
 まれる観測フレームを検索する (図 6 ⑪). この時,
 詳細計算結果の座標を 18 階層の HEALPix インデッ
 クスに変換し, 既存の HPI18 テーブルを参照してこ
 の HEALPix インデックスを含む観測フレームを検索
 する. 18 階層の HEALPix インデックスは 1 秒角の
 分解能に相当する. 検索テーブルに登録した天体の
 うち, 対応する観測フレームが得られるのは, およそ
 10 ~ 20% 程度であり, 残りは, 詳細な位置推算の結
 果, 観測フレームとの対応はないと判明したものであ
 る. 最後に, 検索結果である観測フレームを検索テー
 ブルに入力 (図 6 ⑫) して移動天体検索性テーブルが
 完成する.

2.3.3 ユーザインターフェース

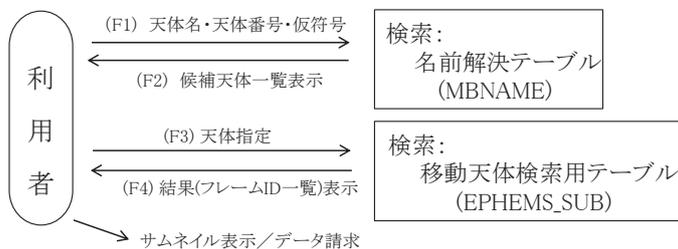
今回, 我々は 2 種類の検索方法を実現した. 1 つは

天体名を指定して, 写っている可能性のある観測フ
 レームを検索する方法 (以下, 順引き), もう 1 つは観
 測フレームを指定して, そこに写っている可能性のある
 移動天体を検索する方法 (以下, 逆引き) である. 図
 7 に検索の流れを示す. 順引き (F) では, 与えられた
 天体情報に一致する天体名を名前解決テーブルから検
 索し (F1), その一覧を表示して利用者に選択を促す
 (F2). 次に, 選択された天体名を検索テーブルから
 検索 (F3) することで, 天体を含む可能性のあるフレ
 ーム ID を与える (F4). 逆引き (R) では, 与えられたフレ
 ーム ID を検索テーブルから検索 (R1) することで, そ
 こに含まれている可能性のある天体一覧を得る (R2).

図 8 は順引きの移動天体検索画面である. 例として,
 彗星 'Mueller' を検索する場合の検索の流れを述べる.
 まず最初に, 検索条件を指定する. "Object Category"
 では 'Comet' を, 次の "Keyword type for Object Name
 Resolve" では 'object Name' を選択し, 入力ボックス
 に 'Mueller' と入力して下の [Resolve] ボタンを押す.
 これにより, 名前解決テーブルを参照して前方または
 後方一致した天体名が検索される. 候補となる天体が
 複数ある場合には, 図 9 のように複数表示して利用者
 に選択を促す. 彗星検索の場合に表示される <> 内の
 4 桁の数字は, 各天体の軌道要素の EPOCH である.
 先に述べたように, SMOKA では EPOCH の異なるも
 のは別天体として扱っているため, EPOCH の違いを
 区別する目的でこのようにしている.

ここでは '120P/Mueller 1' を選択することとする.
 選択すると, 図 10 のような確認画面が表示される.
 ここでは検索オプションとして検索する期間を指定で
 きるが, 初期値は Suprime-Cam の位置較正処理を施

順引き検索 (F)



逆引き検索 (R)

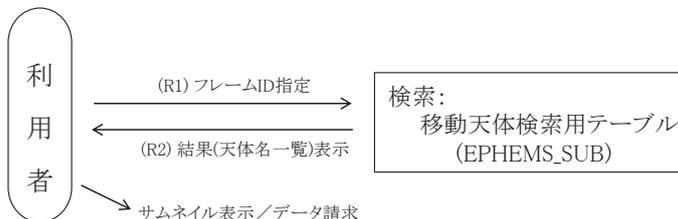


図 7: 移動天体検索における検索の流れ. 順引き (F) では, 利用者が入力した天体情報 (天体名・天体番号・仮符号) に一致する天体を名前解決テーブルから検索し (F1), それらを一覧表示して利用者
 に選択を促す (F2). 次に, 選択された天体名を移動天体検索性テーブルから検索して (F3), 天体を含む可能性のあるフレーム ID を得る (F4). 逆引き (R) では, 利用者が入力したフレーム ID を移動天体検索性テーブルから検索して (R1), フレーム内に写っている可能性のある天体一覧を得る (R2). 順引き, 逆引きともに, 結果表示画面からサムネイル表示画面およびデータ請求画面に進むことができる.

している 2002 年 9 月 28 日から SMOKA で公開している最新の観測データの日付になっている。対象装置は現在のところ Suprime-Cam のみである。この画面で利用者が [Search] ボタンを押すと、検索テーブルを参照して '120P/Mueller 1' が写っている可能性のある観測フレーム一覧が表示される (図 11)。

図 12 は、「逆引き」の検索画面である。「逆引き」は、「順引き」の検索画面トップからリンクが張られている。例えば、'SUPA00311595', 'SUPA00311635', 'SUPA00311675' とフレーム番号を入力して [Search] ボタンを押すと、検索結果として観測フレーム番号とそこに写っている可能性のある天体名一覧が表示される (図 13)。

「順引き」「逆引き」ともに、検索結果画面から、「Data」のチェックボックスにチェックを入れ、[View Thumbnails] ボタンを押すと、図 14 のような別画面が立ち上がりサムネイル画面が表示される。サムネイルでは観測フレームのどのあたりに移動天体が写っているかが丸印で示されるようになってきている。同様に [Datarequest] ボタンを押すと、チェックを入れた観測フレームの既存のデータ請求画面となる。また、利用者が移動天体検索を経て取得する観測フレームには、自動的に Binary Table Extension として移動天体の位置情報を付加している。天体位置は、フレーム上での (x, y) 座標の誤差を半径とする楕円 (誤差情報がない場合には正方形) で表示している。これによ

り、利用者は ds9^{*12} などの画像表示ソフトを使用して観測フレーム上での天体位置を容易に知ることができ。図 15 に ds9 で表示した Mueller 1 の例を示す。

2.3.4 システム運用

システム運用として 2 種類のデータ更新が必要である。1 つは、新たに天体番号が確定した小惑星の追加と彗星の再計算である。小惑星の場合、天体リストを取得し (図 6 ①)、そのリスト内の天体と名前解決テーブルに登録されている天体とを比較して、追加すべき天体を検出する (図 6 ②)。検出した天体について、ラフ計算以下 2.3.2 節で述べた手順 (図 6 ③~⑫) を実行する。彗星の場合はせいぜい 4000 個と天体数が少ないため、天体情報の差分を検知するといった処理はせず、定期的に全天体について天体リストの取得 (図 6 ①) から全ての処理を行う。

表 2 で示したように、新たな 2000 天体の登録にかかる時間はおよそ 8.5 時間である。天体数が多いほど時間もかかるため、可能な限り数千個程度ずつの更新が望ましい。特に新たに天体番号が確定する小惑星は、1 ヶ月間に 2000 個程度増の場合もあれば、1 万個超増の場合もあるので、JPL/HORIZONS 側のデータ更新状況を 1 週間に 1 度は確認し、数千個になった時点で更新作業を開始するという方法が良いと思われる。したがって、データ更新の頻度は、表 2 の作業時間と JPL/HORIZONS でのデータ更新量を考慮して、

* 12 <http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/>

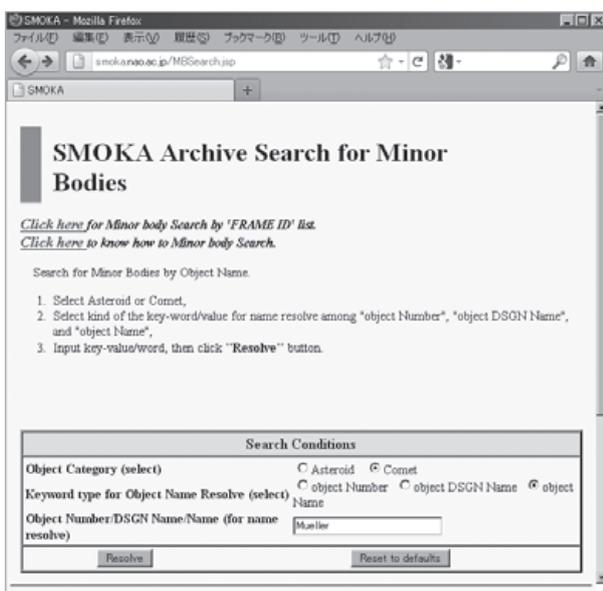


図 8: 移動天体検索「順引き」のトップ画面。小惑星または彗星について、天体名、仮符号、天体番号による検索ができる。

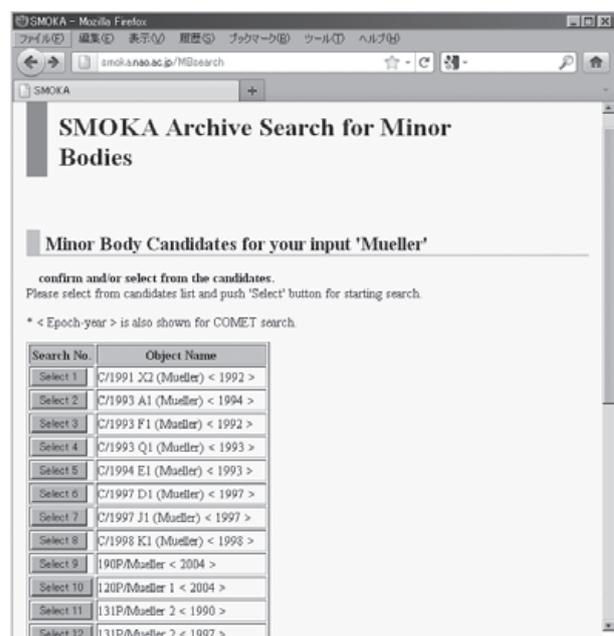


図 9: 天体選択画面。トップ画面で指定した条件に合う天体名一覧が表示される。[Select] ボタンを押して天体を選択する。

小惑星の追加については数週間～1ヶ月に1回、彗星の再計算については数ヶ月に1回を予定している。

2つ目の更新は、Suprime-Camの位置較正済み観測フレームの追加である。この作業は、新たに位置較正が施された観測フレームがHPI18テーブルに登録された後開始する。ラフ計算が既に行われている期

間(1999-08-01～2012-12-31)内での追加であれば、図6の手順⑦から処理を行う。具体的には、位置較正が施された観測フレームリストを作成し、それらの情報だけをSUPテーブルから抽出した、SUP_MB_WCSテーブルを作成する。手順⑦でSUPテーブルの代わりにSUP_MB_WCSテーブルを参照することで、必要な観測フレームに対してのみ、詳細推算が必要な

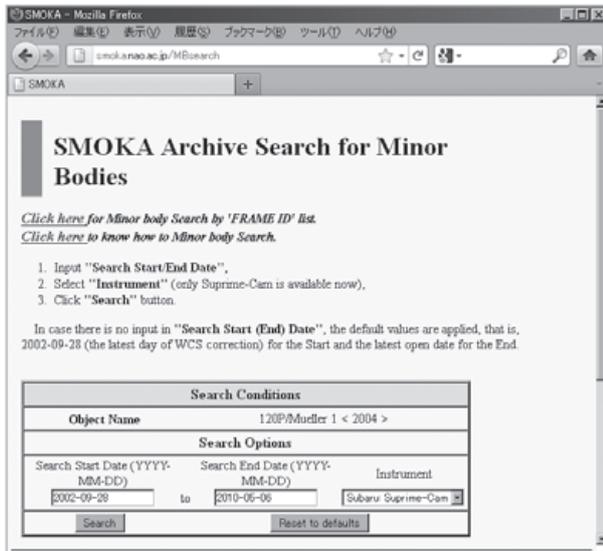


図 10：検索確認画面。選択画面により選択された天体名が入った状態。検索期間は初期値が表示されるが利用者も指定ができる。

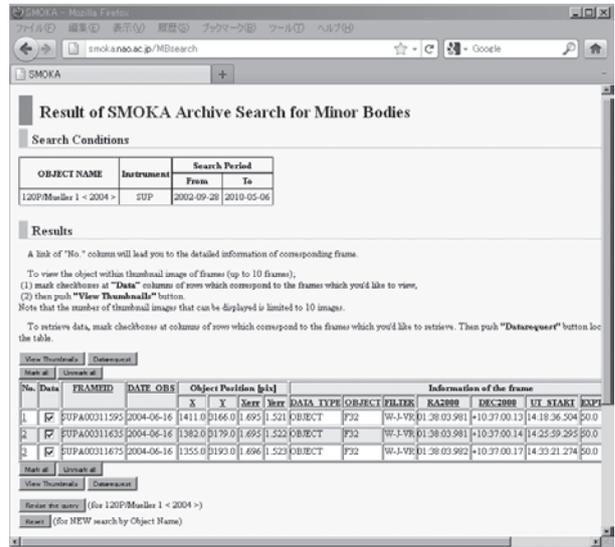


図 11：順引き検索結果画面。検索テーブルを検索した結果、指定した天体が写っている可能性のあるフレームID一覧が表示される。[View Thumbnails]ボタンまたは[Datarequest]ボタンを押すことにより、"Data"のチェックボックスにチェックが入っている観測フレームのサムネイル表示またはデータ請求を行うことができる。

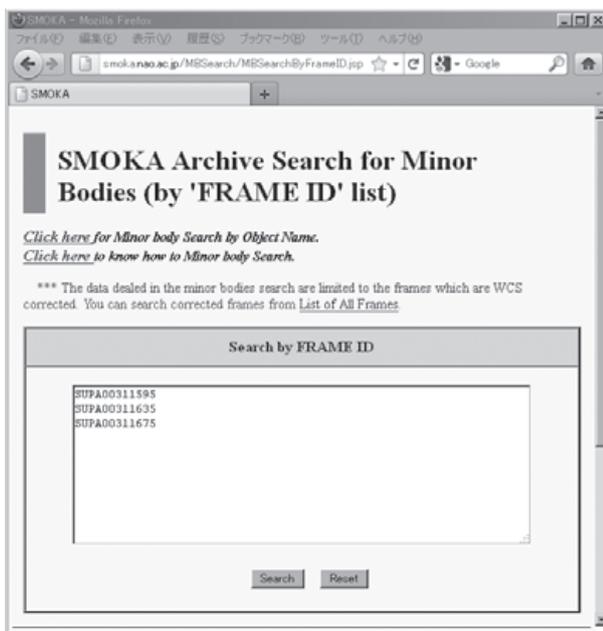


図 12：移動天体検索「逆引き」のトップ画面。ボックス内にフレームIDを入力して下の[Search]ボタンを押すと検索が始まる。フレームIDは、カンマや空白、改行で区切って複数フレームを入力することもできる。

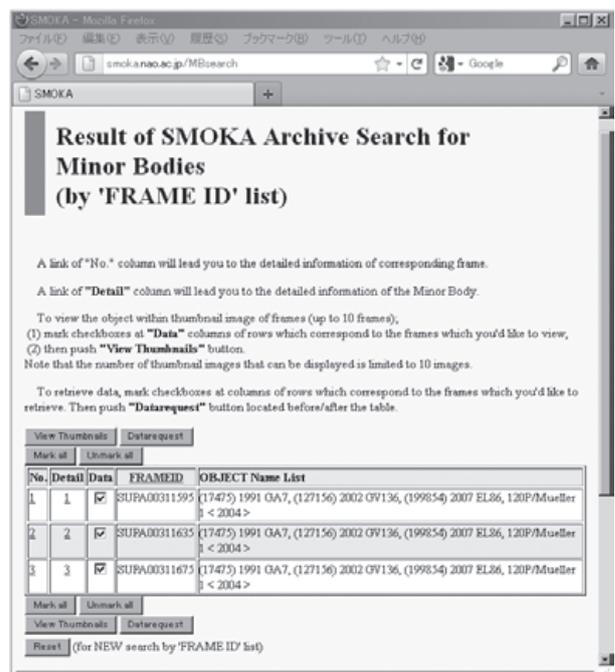


図 13：逆引き検索結果画面。指定した観測フレーム内に含まれている可能性のある天体一覧が表示される。

天体を絞りこむことができる。この手順のためのプログラムは作成済みである。また、現在のラフ計算期間外の観測フレームに位置較正が施された場合には、ラフ計算(図6③)で追加分を再計算し、それ以降の作業を検索期間を指定して同様に行えば良く、現在のプログラムで対応可能である。

2.4 今後の課題

4章で述べるように、木曾の2kCCDの観測フレームにも位置較正が施されている。これらについては12階層のHEALPixインデックス(約1分角の分解能に相当)はデータベースに登録されているが、移動天体検索では18階層のHEALPixインデックスが必要である。HPI18テーブルが作成され次第、検索可能とする予定である。また、Suprime-Camデータについても位置較正済みフレームの登録を増やすことで、検索可能となる移動天体が増えるはずであるので、位置較正処理が急がれる。また、天体番号が確定していない小惑星は、観測がまだ不十分なものが多いと思われる。アーカイブデータの利用価値がより高い。これらのデータ更新手順を確立することも課題である。さら

に、現在のところ「逆引き」ではフレームIDを直接入力する仕様となっているが、利用者が活用しやすいインターフェースとするためにSuprime-Cam専用検索や重複領域検索で得られたフレームIDに対して移動天体検索ができるようにするなどの工夫も必要である。

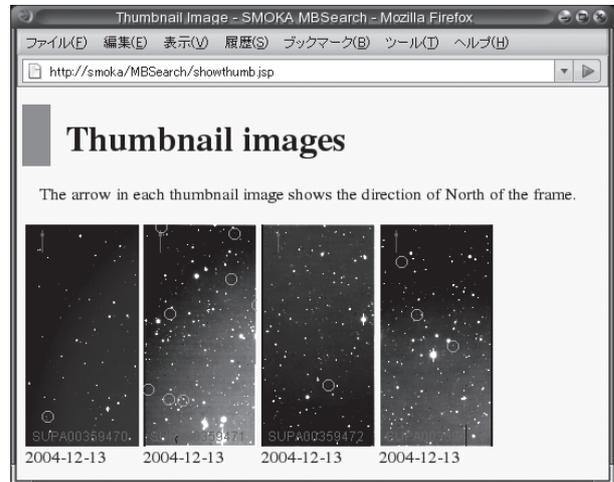


図14: サムネイル画面。検索結果画面で[View Thumbnails]ボタンを押した場合に表示される。各観測フレームに写っている移動天体の位置が○で囲まれて表示される。この図では「逆引き」から検索した複数の天体写っている例を示した。観測フレームは左から、SUPA00359470, SUPA00359471, SUPA00359472, SUPA00359475である。

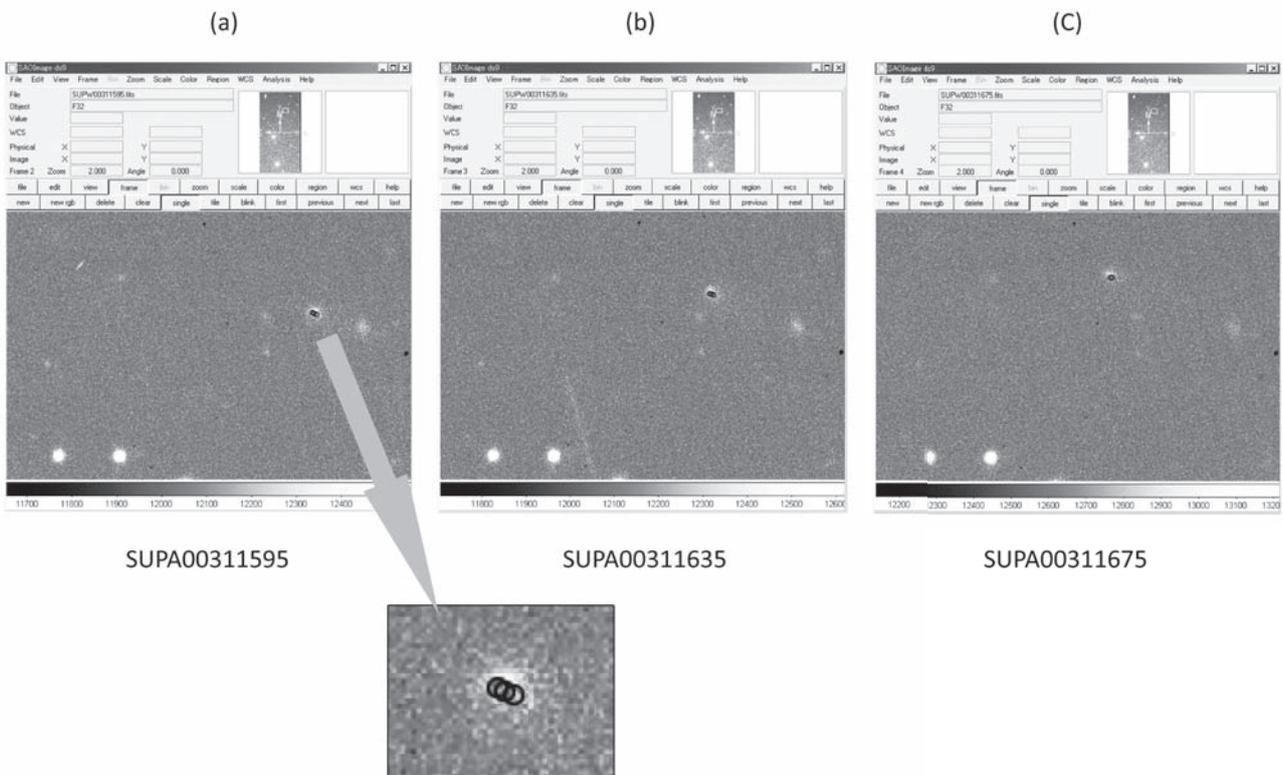


図15: 彗星Mueller 1が写っている可能性のあるSuprime-Camの観測データ SUPA00311595 (a), SUPA00311635 (b), SUPA00311675 (c)をSMOKAから取得し、ds9で表示した例。(a)の天体付近の拡大画像も示す。天体位置は楕円(実際には色つき)で表示される。(a)→(b)→(c)へと時間が進むにつれ、天体が移動していることがわかる。

3. 重複領域検索機能の実装

小惑星などの移動天体や、超新星・変光星などの変光天体の研究では、時間間隔を置いた同じ領域の画像が必要となる。アーカイブデータを利用してこのような研究を行うためには、重複して観測された領域を検索するサービスが必要である。そこで我々は、論文5で試作した重複領域検索の実装を行った。検索対象は、Suprime-Camの2002年9月から2006年5月までの位置較正済み 64984 フレームである。実装後

に各種性能を評価した結果、データベース(DB)への入力速度や検索速度の面で改良が必要であることが明らかになった。また、当初の検索インターフェースは、重複回数などを入力し、その結果をテキストリストで得るものであったため、重複している領域の分布や、その領域がどの程度の広がりを持っているかといった判断が難しかった。そこで我々は、重複領域検索システムの検索および表示速度を改良するとともに、重複している領域を視覚的に把握できるようなユーザインターフェースを追加した。SMOKAの重複領域検索は、2010年1月27日より公開している。

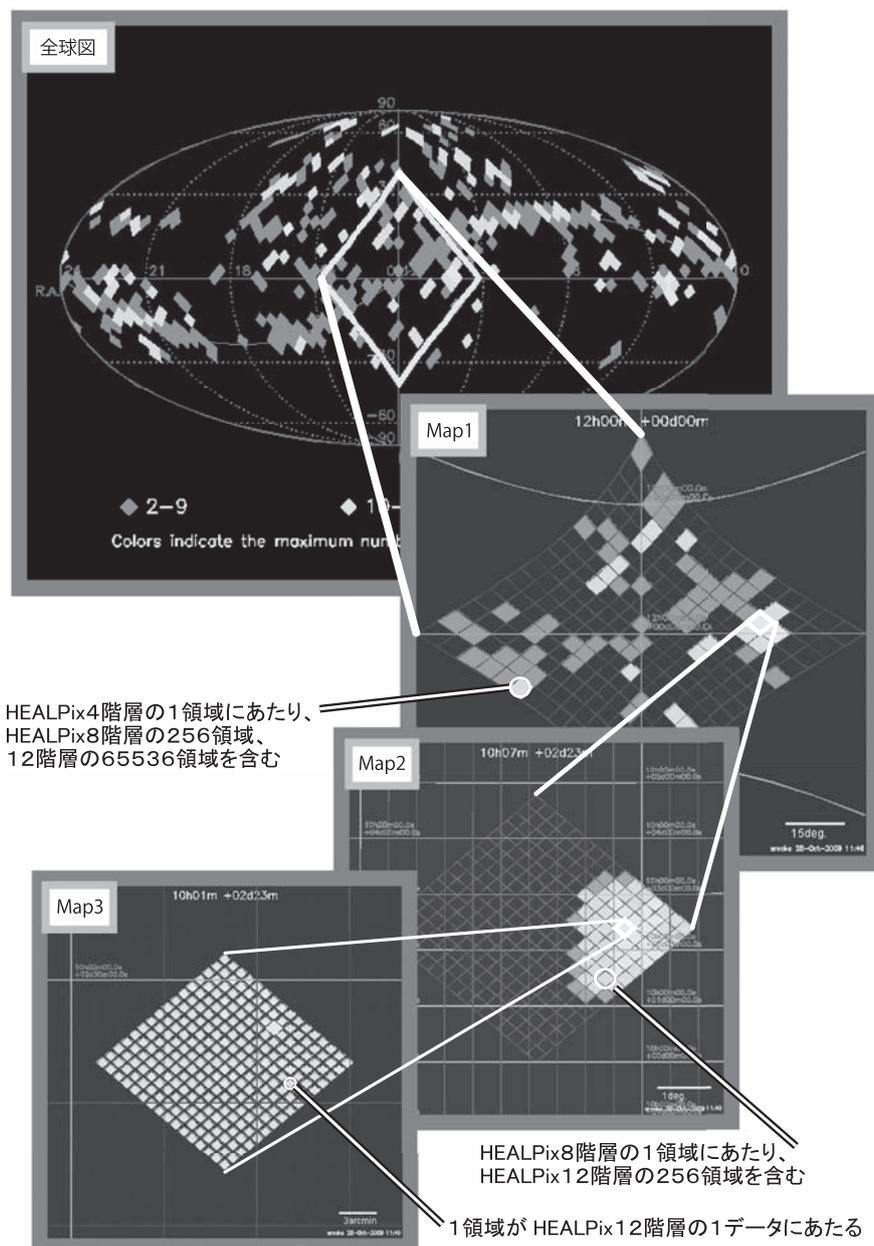


図 16 : Suprime-Camの重複領域検索における重複度の分布図表示とクリック操作による図の変遷。それぞれの図にある白い太線で囲まれた領域が選択された部分。重複度数は、実際は赤(100 フレーム以上)、緑(10 から 99 フレーム)、青(2 から 10 フレーム)で示しているが、ここでは白黒化している。Map3 の領域 1つが HEALPix 12 階層の 1 データにあたり、 0.738 arcmin^2 となる。

3.1節では、重複領域検索における直観的な理解と検索のためのユーザインタフェースについて、3.2節では実現のための工夫について、3.3節ではSuprime-Camに続き開発・公開した木曾観測所 2kCCDのDB構築からユーザインタフェース開発について、3.4節では有用な形態の重複領域検索の実現に向けた課題について論じる。

3.1 ユーザインタフェースの開発

3.1.1 開発の方針

重複領域検索では、観測フレームの重なり度合(重複度数)の高さが検索の基準となる。論文5での試作システムに改良を加え、天球上の重複度数の高さを、降順に並べた数値のリストとして提供することは、簡素な検索ツールを加えるなどの短期的な開発で実現できる。しかしながら、それだけでは重複度数の空間分布(単にデザインによる重なりであるか、極度に集中して観測がなされた領域であるかなど)といった、利用者にとって有用な情報は得られない。このように重複領域検索における情報提示では、空間分布を理解するための図を提供する機能が重要である。

本機能では、HEALPixによる天球分割法を利用するが、実際の研究で有用だと思われる重複領域面積として、約1分角の分解能を採用する。これはHEALPixの12階層による分割に相当し、1領域は 0.738 arcmin^2 、分割数は 2.01×10^8 となる。しかし、一般的なPCのモニターのピクセル数が100万から200万画素であることを考えると、この分割数は極端に大きいため、その解像度のままではモニターの分解能が足りず、全球での重複度数分布を正確に示すことは不可能である。そこで広域表示では分解能を意図的に落とし、階層的な拡大表示を行うに従って、分解能を上げていく手法をとることとした。

図を拡大表示するユーザインタフェースとして、クリックابلマップ(イメージマップ)を採用した。クリックابلマップでは、Webブラウザ上に表示された画像上に、多角形の領域のリンクを作成できる。また、プラグインなどソフトウェアの追加の必要性がなく、多くのブラウザで実現可能であり、さらに計算機環境依存性が低いことが採用の理由である。このクリックابلマップを使い、利用者がマップ上のリンクをクリックした際に図を拡大し、表示する天域を狭めることとした。この拡大操作により、対象となるフレーム数がリスト表示できる程度まで十分少なくなった時点で、観測フレームのFRAMEIDや観測日時、時間的

間隔など、利用者がデータを選択するための様々な情報を概要リストとして提供するものとする。

3.1.2 ユーザインタフェースの概要

重複領域検索は、SMOKAトップページから選択することができる。Suprime-Camデータの重複領域検索における重複度の表示の例を図16に示す。図16では、クリック操作による図の遷移と、HEALPixインデックスの階層の関係も示している。利用者は、まず重複領域検索トップ画面で全球の重複度数分布を眺める(図16, 全球図)。ここでは重複度数が段階的に色分けされており、重複度の高い領域がどこに存在するかなど、分布全体の概要を把握できる。全球図から領域を選択すると図16のMap1が表示される。そこからさらにクリックしていくことで、Map2, Map3の順に16倍ずつ拡大して表示され、より分解能の高い図を閲覧できる。

Webブラウザ上での実際の表示の様子を図17に示す。移動天体や変光天体の場合には、重複領域をもつ複数の観測フレームの時間間隔や総露出時間、フィルターの種類といった情報が必要である。そこで、Map3またはMap3からさらに1領域選択した図を表示する際に、そこに含まれるフレームIDや観測日時などの情報、また取得時間間隔を示す時系列情報を表示することとした。時系列表示は、テーブル2(論文5図6)からフレームの観測日付を取得し、月ごとに集計してその合計を表示している。

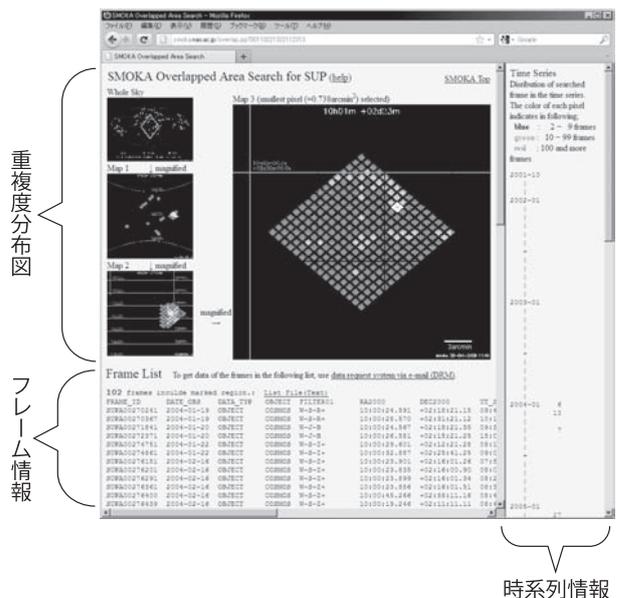


図17: Webブラウザ上に表示されたSuprime-Camの重複領域検索画面。上部左側に広域のサムネイル、中央に重複度数分布図、下部左側にフレーム情報(FRAMEID, 観測日時, 露出時間, フィルターなど)、右に時系列情報を示す。フレーム情報ならびに時系列情報は、Map3が表示された場合に示される。

3.2 ユーザインタフェース実現のための工夫

3.2.1 重複度数の作図

3.1.2 で述べたユーザインタフェースにおいて、Map3 に描かれる最小の領域は 0.738 arcmin^2 であり、HEALPix インデックス 12 階層の 1 領域にあたる。これはテーブル 3 (論文 5 図 6) の 1 行のデータに相当する。従って、表示する範囲が広域であるほど DB テーブルに対する検索量が多くなる。例えば、全球図の場合、テーブル 3 (登録行数 126 万行) に対し、最大で約 6 万件の結果を得る検索を約 3 千回繰り返すため、検索に約 2 分を要する (使用している計算機は FUJITSU P450)。この処理を利用者が検索時に行えば、描画にかかる時間を加えて結果の表示までに 2 分以上を要してしまい、利用者への負担となる。Suprime-Cam の位置較正処理は、1 観測期間 (およそ 1 か月) ごとに行うこととしている。そこで、位置較正を行うたびに表示する画像すべてを用意しておき、それを利用者に表示する、という仕組みにすることで、DB テーブル検索に要する時間を省略し、利用者の待ち時間を短縮することとした。

画像作成の流れを図 18 に示す。画像作成における作業は、(a) テーブルからの検索、(b) 作図、(c) クリックابلマップに関する情報の登録、の 3 段階で構成されている。Map1, Map2, Map3 の 1 枚に含まれる 256 領域に対して、テーブル 3 から 1 領域ごとの重複度数の最大値を検索する。重複度数が 100 フレーム以上を赤、10 から 99 フレームを緑、2 から 9 フレームを青として 3 段階で描く。この際に各領域を囲む画像上の 4 点の座標を、今回新たに作成した DB テーブル (テーブル 4) に登録する。テーブル 4 は、クリックابلマップの情報として用いる。重複度の全ての図を作成するのに要する時間は、検索対象としている 64984 フレームの場合で (a) テーブル 3 の検索に 3 時間、(b) その情報から分布図を作成するのに 1 時間、(c) テーブル 4 への登録に数分である。なお、データベース管理ソフトウェア (RDBMS) として Sybase 15.0 を用いた。

3.2.2 その他の改善・変更点

Suprime-Cam の 1 フレームに含まれる領域の HEALPix インデックスの計算には、FUJITSU P450 を用いて 300 秒程度要する。そのため、現在、位置較正が施されている 64984 フレーム (Suprime-Cam デー

テーブル 3

カラム	HPI12	NFrame	ExpTime	ET(B _i)	...	ET(z [*])	NFilter
説明	HEALPix インデックス (12 階層)	フレーム数	総露出時間	露出時間 (B _i)	...	露出時間 (z [*])	フィルター数

(a) 1つの拡大図にある 256 領域において、重複度数の最大値を取り出す

一時ファイル (テキスト形式)

(b) 重複度を3段階に色分けし描く

テーブル 4

カラム	HPI	ImageMapChar
説明	HEALPix インデックス	クリックابلマップ情報 (HEALPix インデックス 1, ピクセル値 x_1 , ピクセル値 y_1 , ..., HEALPix インデックス 2, ...)

(c) クリックابلマップの情報を登録する

画像ファイル

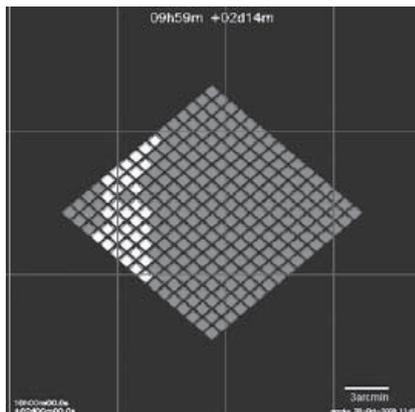


図 18: 画像作成の流れ。テーブル 3 より重複度数を検索し、3 段階に分け、描画する。領域を囲む画像上のピクセル座標 (x, y) をテーブル 4 へ登録し、クリックابلマップの情報として用いる。

タ約4年分)に対しては240日程度の総計算時間が必要であるが、サーバーとCPUを複数使用して並列化する事により、計算時間を20日程度に短縮することができた。また、プログラム各所の効率化、およびテーブル入力手順の簡略化により、テーブル入力時間を短縮し、Suprime-Camのデータでは運用に支障のない速度となった。具体的に、テーブル2,3への入力時間は、それぞれ3.5時間/10000フレーム(論文5で用いたプログラムを使用すると4時間/10000フレーム)、4時間/10000フレーム(同40時間/10000フレーム)であった。現在、テーブル2,3の行数は、それぞれ820万行、127万行である。ただし、論文5で述べたように、さらに、Map3で表示する時系列情報を効率的に取得するため、テーブル2に観測日付とMJDを加えた。

3.3 木曾 2kCCD データの組み込み

重複領域検索の最初の対象としたSuprime-Camと同様、観測装置の視野が広く、取得されているフレーム数が多い木曾観測所2kCCDのデータの組み込みを行った。Suprime-Camの手順に、以下で述べる2kCCDデータ特有の実装を加え重複領域検索を構築した。

2kCCDフレーム(視野 $50' \times 50'$)のHEALPixインデックス化は、Suprime-Camデータ用のプログラムを2kCCDの位置較正(一次式)に対応するよう改変したものを用いた。1フレームを18500個程度のHEALPixインデックスに分割することとし、計算にはFUJITSU P450を用いて18分の時間を要した。位置較正が施された70790フレームのインデックス計算には、複数サーバーとCPUを用いて2ヶ月程度を要した。

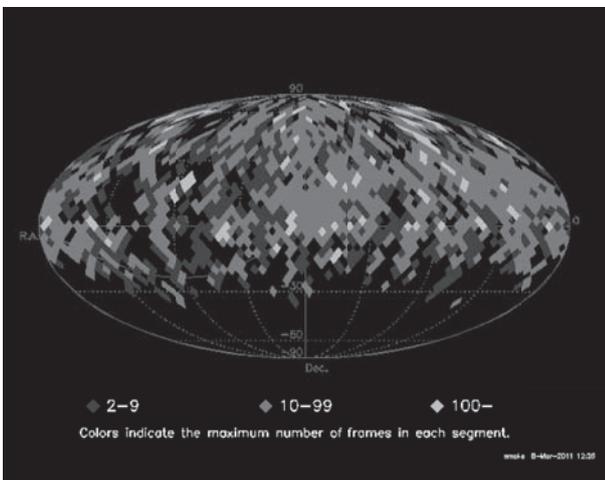


図19: 木曾観測所2kCCDの重複度数の全球図。図16に示すSuprime-Camの重複度数分布と同様、実際には赤、緑、青の3段階で重複度数を示している。

DBテーブルへの入力プログラムはSuprime-Camと同じものを用いている。テーブル2,3への入力時間は、それぞれ26時間/10000フレーム、0.95時間/10000フレームであった。現在、テーブル2,3の行数は、それぞれ4165万行、592万行である。

図18で示した重複度数の図を作成するのに要する時間は、検索対象の70790フレームで(a)テーブルの検索に25時間、(b)図の作成に8時間、(c)テーブル4への登録に数分を要した。図19に木曾観測所2kCCDの重複度数を表す全球図を示す。

木曾2kCCDの重複領域検索は、2010年12月16日に公開開始した。

3.4 課題

本開発では、重複領域検索の実現を最優先したため、様々な制限を加えている。現在の重複度数の表示では、あらかじめ分類した3段階の重複度数を3色で分類して表示しているため、利用者はその条件を自由に換えられず、任意の重複度数の分布図を見ることができない。また、現在は総露出時間やフィルターの数、またフィルターの組み合わせなどの条件付けをする機能がない。露出時間やフィルターでの検索条件を与える場合、利用者がその条件を変更できることが望ましい。しかし、露出時間やフィルターの種類など、すべての条件の組み合わせを事前に用意することは現実的ではない。また利用者から、任意の天体(座標)の周辺において、フレーム数や露出時間、フィルター数などの条件を指定して重複領域を検索する機能の要求が出されている。

以上のような機能の実現には、利用の際にテーブルを検索して分布図の描画を行うことが必要であるため、実行速度の向上が重要である。我々は、DBテーブルの再構築や検索用SQLのチェック、また検索の並列化などにより、テーブル検索から描画までを数秒程度で行う目標について見通しをつけており、高速化の検討を行っている。

また、Suprime-Camデータは有用性が高いが、現在は、作業の遅延により2002年9月から2006年5月までの64984フレームしか位置較正されていない。加えて、2008年7月以降のデータについては、Suprime-Camが更新されてデータの形式が変わったため、我々の位置較正プログラムが対応していない。今後、可能な限り早急な対応を行うことを考えている。

4. 木曾観測所 1kCCD/2kCCD データの位置較正

木曾観測所の 1kCCD データ, 2kCCD データは 105cm シュミット望遠鏡の主焦点に置かれた CCD カメラによって得られた撮像データである. 1993 年から現在まで約 18 年間にわたるデータが公開されており, 彗星や小惑星などの移動天体や変光天体を観測したデータも多く, アーカイブデータとして貴重で価値が高いものである. 実際, SMOKA から取得されたデータを用いた研究成果もいくつか出ている (第 6 章参照). しかしながら, 1kCCD/2kCCD データの FITS ヘッド中の情報には誤りや欠落, 精度が不十分など問題点が多く, 特に位置情報の誤りや低い精度は利用の面でも検索の面でも深刻な障害となっている. そこで本論文では, 木曾観測所 1kCCD/2kCCD データの位置較正を行い, これらのデータの価値を高めて利用の促進をはかることとした. 本章ではその手法と結果について概要を述べる. 手法の詳細およびその分析については別の論文で述べる予定である.

位置較正の手法として, 各フレームから星像を検出し (CCD 上座標), それを位置標準星 (標準座標に変換) と直接マッチ/フィットして標準座標と CCD 上座標の間の変換式を求め, という一般的な方法を採用した. シュミット望遠鏡の光軸付近は光学的歪みが少なく, 標準座標と CCD 上座標の間の変換式は低次の項のみで済むと予想され, 特別な方法は不要であると思われるからである. 1kCCD データ, 2kCCD データともに, 星像検出は SExtractor 25) (バージョン 2.8.6), 検出した星と位置標準星のマッチ, および標準座標と CCD 上座標の間のフィットは WCSTools 26) (バー

ジョン 3.8.1) を用いた. マッチの許容量は 5 ピクセルとし, 簡便のため, 飽和星像をマッチ/フィットから明に除くことは行わなかった. 変換式は, 一次変換 (2×2 の行列) と並行移動 (2 方向) の自由度 6 とした. 位置標準星は, UCAC3 27) を用い固有運動を加えた. いずれも 1 回目の位置較正の結果を初期値とした 2 回の位置較正を行った.

なお, 1kCCD/2kCCD データの諸元: 画素サイズ, CCD サイズ, 視野 (一辺) は以下の通りである.

1kCCD : 0.75 arcsec/pixel, 1000 × 1018, 12.5 arcmin
2kCCD : 1.50 arcsec/pixel, 2048 × 2048, 51.2 arcmin

(1) 2kCCD データの位置較正

1kCCD に比べ 2kCCD は視野が広く, 標準星がより多く写っていることが見込まれるため, まず 2kCCD の位置較正から行った. フィットに採られた標準星の数が 30 個以上で, 残差の平均が 0.75 arcsec (0.5 画素) 未満のフレームを採用とした. 結果の残差分布を図 20 に示した. 位置較正を施したフレーム数は 70940 である. 位置較正が良好に行われたことがわかり, これによって, 前述の手法やパラメータが妥当であることがわかった. また, FITS ヘッドに記載された位置と較正後の位置の関係を図 21, 22, 23 に示した.

これらのずれは, 赤緯エンコーダー値の繰上がりの際の飛び, 恒星時情報が制御系に正しく伝達しない, など望遠鏡や制御系によるものと考えられ, この結果は観測所にフィードバックされて対策がとられつつある. このようなヘッド記載位置が真と思われる位置よりも大きくずれているデータでは, WCSTools を単純に用いるだけでは較正ができない. そこで実際の

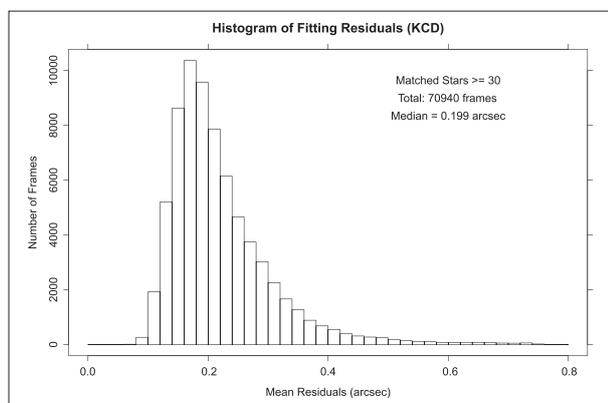


図 20 : 2kCCD (KCD) データの位置較正フィットの残差平均のヒストグラム. マッチできた星の数が 30 以上で, 残差平均が 0.75 arcsec 未満の 70940 フレームが含まれている. 残差平均のメディアンは 0.199 arcsec である.

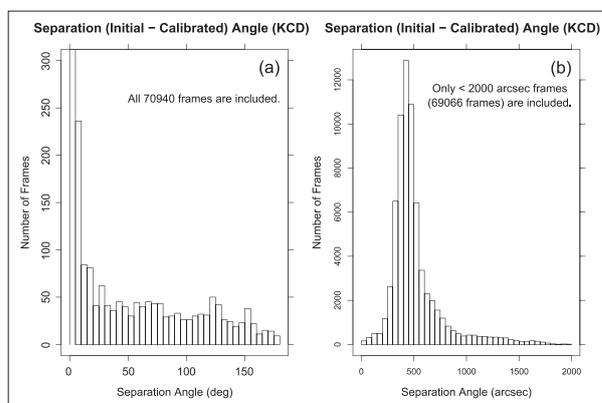


図 21 : 2kCCD (KCD) データの FITS ヘッドに記載された位置と, 位置較正後の位置の差 (角度) の分布を示した図. (a) 全 70940 フレームについて示した. 差が大きいフレームを明示するために, 一部のピンはスケールアウトさせている. その部分の詳細は (b) に示した. (b) 差が 2000 arcsec 未満の 69066 フレームについて示した.

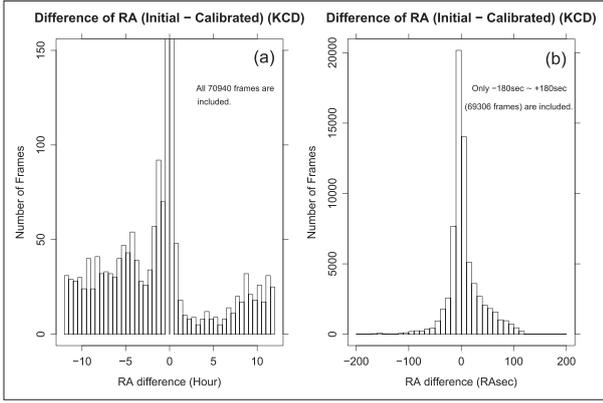


図 22 : 2kCCD (KCD) データの FITS ヘッダに記載された赤経の値と、位置較正後の赤経の値の差の分布を示した図。

(a) 全 70940 フレームについて示した。差が大きいフレームを明示するために、一部のピンはスケールアウトさせている。その部分の詳細は (b) に示した。

(b) 差が ±180sec 以内である 69306 フレームについて示した。

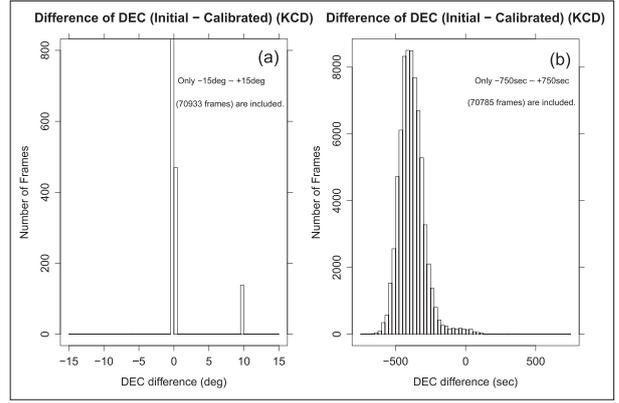


図 23 : 2kCCD (KCD) データの FITS ヘッダに記載された赤緯の値と、位置較正後の赤緯の値の差の分布を示した図。

(a) 差が ±15 度以内の 70933 フレームについて示した。差が大きいフレームを明示するために、一部のピンはスケールアウトさせている。その部分の詳細は (b) に示した。

(b) 差が ±750sec 以内である 70785 フレームについて示した。

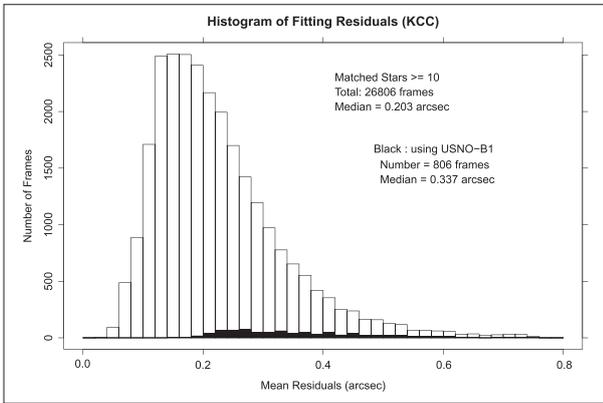


図 24 : 1kCCD (KCC) データの位置較正フィットの残差平均のヒストグラム。マッチできた星の数が 10 以上で、残差平均が 0.75 arcsec 未満の 26806 フレームが含まれている。残差平均のメディアンは 0.203 arcsec である。そのうち、806 フレームは標準星として USNO-B1 を用いており、ヒストグラム上で黒色で示している (メディアンは 0.337 arcsec)。

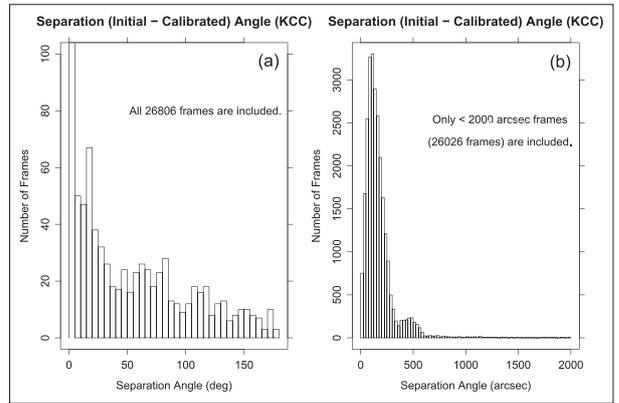


図 25 : 1kCCD (KCC) データの FITS ヘッダに記載された位置と、位置較正後の位置の差 (角度) の分布を示した図。

(a) 全 26806 フレームについて示した。差が大きいフレームを明示するために、一部のピンはスケールアウトさせている。その部分の詳細は (b) に示した。

(b) 差が 2000 arcsec 未満の 26026 フレームについて示した。

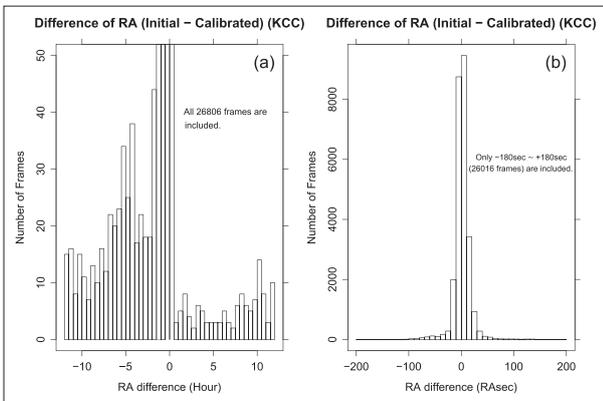


図 26 : 1kCCD (KCC) データの FITS ヘッダに記載された赤経の値と、位置較正後の赤経の値の差の分布を示した図。

(a) 全 26806 フレームについて示した。差が大きいフレームを明示するために、一部のピンはスケールアウトさせている。その部分の詳細は (b) に示した。

(b) 差が ±180sec 以内である 26016 フレームについて示した。

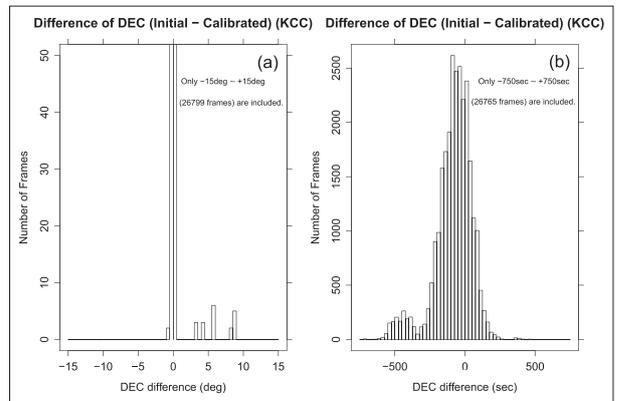


図 27 : 1kCCD (KCC) データの FITS ヘッダに記載された赤緯の値と、位置較正後の赤緯の値の差の分布を示した図。

(a) 差が ±15 度以内の 26799 フレームについて示した。差が大きいフレームを明示するために、一部のピンはスケールアウトさせている。その部分の詳細は (b) に示した。

(b) 差が ±750sec 以内である 26765 フレームについて示した。

作業では、観測野帳の記載を調べる、前後のフレームから推測する、自作の位置自動検出ツールを用いる、などの方法で真に近い位置を見出し、その上で WCSTools を用いてマッチ/フィットを行った。これらの手法の詳細、およびその分析は別の論文で述べる予定である。

(2) 1kCCD データの位置較正

1kCCD データは、2kCCD データに比べ、前述の通り視野(一辺)が約 4 分の 1 であるため、標準星の数が多く採れないという問題が生ずる。そこで、フィットに採られた標準星の数が 10 個以上で採用とし、UCAC3 で標準星の数が足りない場合は、標準星として USNO-B1 28) を用いた。また残差平均は 2kCCD データと同じく、0.75 arcsec (1 画素) 未満のものを採用とした。結果の残差分布を図 24 に示した。また、FITS ヘッダに記載された位置と較正後の位置の関係を図 25, 26, 27 に示した。FITS ヘッダ記載の位置が真と思われる位置よりも大きくずれているデータでは、2kCCD データと同様の手法で真に近い位置を見出した上で WCSTools を用いてマッチ/フィットを行った。

今回の位置較正では、

- ・ 彗星を追尾しているなどで恒星が流れているデータ、
 - ・ 対物プリズムやグリズムを用いたデータ、
- は対象としなかった。今回の単純な手法では対応できないからである。しかし、これらのデータもアーカイブデータとして価値が高く、今後、位置較正の対象としていきたいと考えている。

位置較正の情報はデータ請求の際に Header Replacer (論文 3 2.5 節) によって FITS ファイルのヘッダ部に埋め込まれる。また、WEB 上の各フレームに対する詳細情報ページで見ることできる。

5. その他の開発項目

SMOKA では複数観測所の多くの観測装置データや環境データを組み込み、研究・教育に活用できるデータとして提供している。この章では、2~4 章で述べた開発以外の機能や効率の強化、および拡充を SMOKA に施した項目について記述する。

5.1 新観測装置データの公開とシステムへの組み込み手順の効率化

SMOKA では、これまで提供してきた複数観測所の

観測装置データ(計 18 装置: 論文 5)に加え、さらに以下に挙げる 5 つの観測装置データを SMOKA に組み込み、公開を始めた。

岡山天体物理観測所の観測装置

- ・ ISLE (近赤外撮像・分光装置 16)) : 2009 年 7 月 30 日公開
- ・ KOOLS (Kyoto Okayama Optical Low-dispersion Spectrograph, 可視低分散分光撮像装置 17), 18)) : 2010 年 1 月 8 日公開

広島大学東広島天文台かなた望遠鏡

- ・ HOWPol (Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter, 一露出型偏光撮像装置 19)) : 2010 年 6 月 7 日公開

すばる望遠鏡

- ・ HiCIAO (High Contrast Instrument for the Subaru Next Generation Adaptive Optics, 高コントラストコロナグラフ撮像装置 20), 21), 22), 23)) : 2011 年 8 月 29 日公開
- ・ FMOS (Fiber Multi Object Spectrograph, 光ファイバー多天体近赤外分光装置 24)) : 2011 年 8 月 29 日公開。

新規観測装置データのシステム組み入れに際しては、公開前にサンプルデータを元に、必要な情報に不足がなく正確か判断し、必要な場合には修正や追加を施す処理方法を確認しておくなくてはならない。岡山天体物理観測所の新規装置データ (KOOLS, ISLE) および広島大学東広島天文台かなた望遠鏡の新規装置データ (HOWPol) に関しては、既存の装置 HIDES (High Dispersion Echelle Spectrograph) 29) (論文 26 章) と同様、ヘッダ情報にはないが、SMOKA 登録に必要な GALLONG (銀経), GALLAT (銀緯), ECLLONG (黄経), ECLLAT (黄緯), さらに KOOLS のみヘッダキーワード値がない MJD (Modified Julian Date) を登録時に算出し入力することとした。一方、すばる望遠鏡の新規 2 装置 (HiCIAO, FMOS) のデータに関しては、現状のシステム運用の効率化を図るために、DB テーブル構造の変更を行った。概要を以下に示す。また、図 28, 29 に全体の流れ図を示す。

1). ヘッダキーワード情報テーブル (1 次テーブル) の生成

すばる望遠鏡の観測装置のヘッダ情報は、これまで STARS (Subaru Telescope ARchive System) *¹³, 30), 31) と MASTARS (Mitaka Advanced STARS) *¹⁴ のテーブルから得ていた(論文 4 4.3 節(1)

*¹³ <https://stars.naoj.org/>

*¹⁴ <http://www.mastars.nao.ac.jp/mastars/>

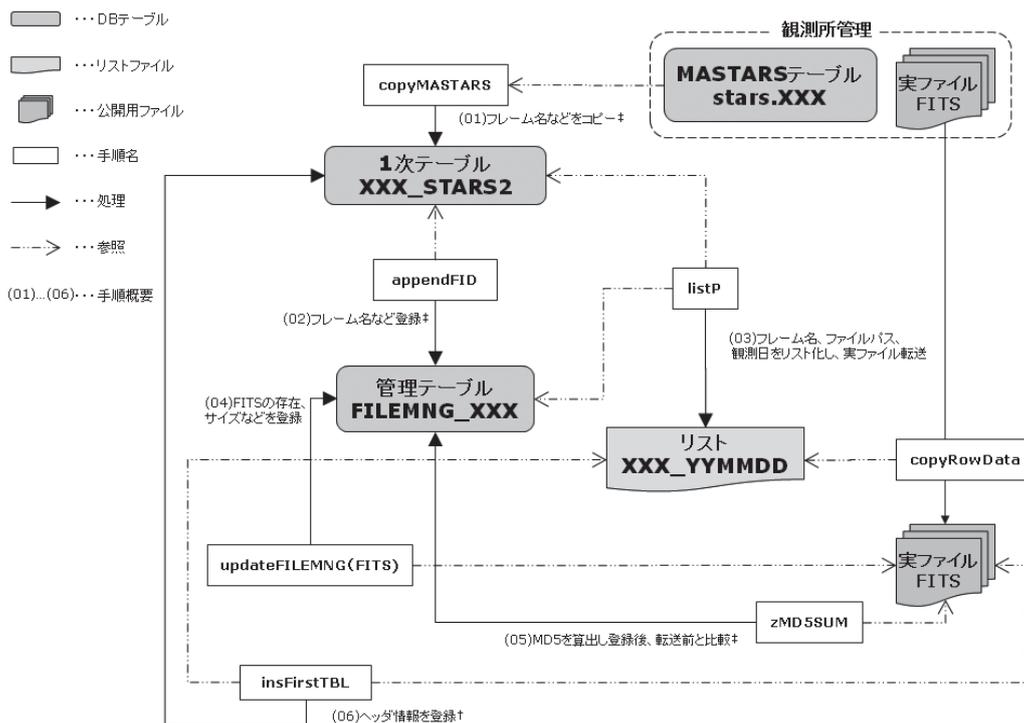


図 28：データの流れを含めたテーブル構成図（1次テーブル完成まで）。SMOKAで用いられているHiCIAOとFMOSの装置データ組み込み処理の、1次テーブル完成までの流れと、テーブルの相互関係を示す。公開条件を満たすデータをMASTARSからSMOKAへコピーし、FITSファイルからヘッダ情報を1次テーブルへ登録している。処理の流れは実線矢印、処理に必要な参照関係は破線矢印で表している。また、†は新規追加した手順、‡は処理内容や順序が変更になった手順を表している。詳細については5章および論文2(7章)を参照のこと。なお、他の観測装置の処理およびテーブル関係はこの限りではない。

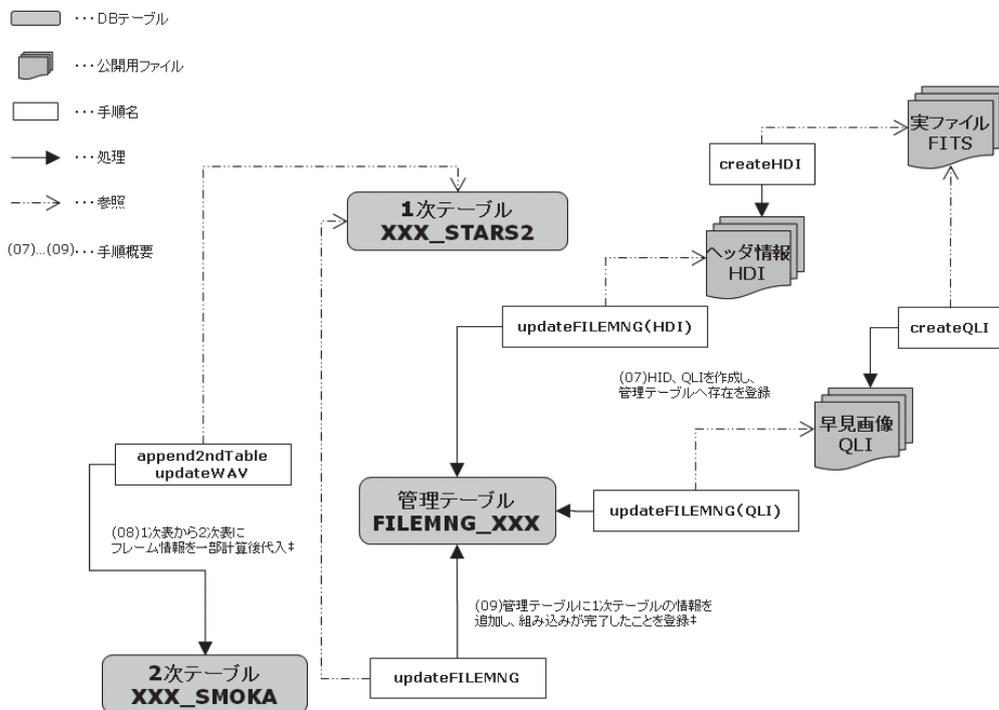


図 29：データの流れを含めたテーブル構成図（2次テーブル完成まで）。SMOKAで用いられているHiCIAOとFMOSの装置データ組み込み処理の、1次テーブル完成後から2次テーブル完成までの流れと、テーブルの相互関係を示す。ヘッダ情報ファイル、早見画像を作成し、2次テーブルに必要な情報を1次テーブルから追加（一部算出）し、管理テーブルへ登録を行っている。処理の流れは実線矢印、処理に必要な参照関係は破線矢印で表している。‡は複数処理を統一したことなどにより、処理内容が変更になった手順を表している。詳細については5章および論文2(7章)を参照のこと。なお、他の観測装置の処理およびテーブル関係はこの限りではない。

p75 参照). しかしながら MASTARS は全てのヘッダ情報を保持しているわけではない. また, STARS から STARS 2^{*15} への移行に伴い, データベース管理システム (RDBMS) が変更になったこと, ならびに STARS 2 のテーブル構造が STARS から変更されたことを踏まえ, 新しく追加した FMOS, HiCIAO のデータに関しては, MASTARS テーブルから 6 カラム (FRAME_ID: フレーム ID, DATE_OBS: 観測日, PUBLICFLAG: 公開判定, PUBLICTIME: 公開日, FILENAME: ファイル保管場所, MD5RESULT: MD5 Result from Frame) のみコピーを行い, FITS ファイルから独自にヘッダ情報を抜き出して, 1 次テーブルを生成することとした.

2). 検索テーブル (2 次テーブル) への付加情報追加

1) の変更に伴い, ヘッダキーワードには存在しないが検索時に必要な X_2000, Y_2000, Z_2000 (2000 年分点での直交座標値成分) の値を計算して検索テーブル (2 次テーブル) へ代入した. また, RASEC (赤経の秒単位表記), DECSEC (赤緯の秒単位表記), GALLONG, GALLAT, ECLLONG, ECLLAT, ZD (天頂距離) の値は, それぞれヘッダキーワードに存在しない装置について, ヘッダの他の値から一部 SLALIB 32) を用いて算出し, 検索テーブルへ代入するよう変更した.

3). データ組み込み順序変更

上記 1), 2) で述べた改変 (図 28 copyMASTARS, 図 29 append2ndTable) に伴い, FMOS, HiCIAO の 2 装置については, 従来の SMOKA へのデータ組み込み手順を一部変更した. また, データの欠損等を速やかに検知したり, 人為的ミスを減らすことを目的に, MD5 のチェックをデータ転送直後に実行するよう変更した (図 28 zMD5SUM). これにより, 早期にデータ転送のエラーを発見することが可能となった.

今後は, 2013 年に予定されている計算機システムの更新に合わせた, SMOKA の RDBMS の変更も視野に入れた検討を行い, 他の既存装置データについても組み込み手順の改変を進めていく予定である.

5.2 新環境データの組み込み

環境データとは, 観測時の気温・湿度や風向・風速などの数値データならびに雲モニターなどの画像デー

タである. SMOKA ではこれまでに, すばる望遠鏡, 岡山天体物理観測所, 木曾観測所の環境データを同様のユーザインタフェースで閲覧できるよう, 統合したシステムとして開発を行った (論文 5). 今回は, 東広島天文台ならびに MITSuME (岡山, 明野) の環境データを新たに加えた.

1). 東広島天文台の環境データについて

東広島天文台では, かなた望遠鏡ドーム内で気温, 湿度, 気圧を, 屋外で気温, 湿度, 気圧, 風向, 風速, 日照, 降雨ならびに空モニター画像を取得している^{*16}. SMOKA の環境データの閲覧機能では, 屋外の気温, 湿度, 気圧, 風向, 風速ならびに空モニター画像を閲覧できる. データの記録頻度は, およそ 10 分間に 1 度である. 複数観測所から得られる環境データ表示機能がすでに統合されていること, および東広島天文台での測定が安定かつ継続的に行われていることから, 東広島天文台の環境データを SMOKA へ組み込む作業は順調に進められた.

2). MITSuME の環境データについて

MITSuME では, 観測データの FITS ヘッダにドーム外の気温, 湿度, 気圧, 風向, 風速が記録されており, SMOKA ではこれを抽出して環境データ閲覧用に用いている. 環境データの取得頻度は観測フレームの取得頻度に依存しているため不定期であり, 主に夜間のみである. なお, MITSuME の測定環境に関しては未確認の部分があるため, 今後, 調査し確認する予定である.

5.3. データ請求へのメモファイル添付

SMOKA では, データ請求の際に Header Replacer (論文 3 2.5 節) によって FITS ヘッダ情報の修正 (追加, 削除を含む) が施されたデータ (FITS ファイル) が提供される. 追加情報の中には位置較正の結果も含まれる. あらかじめ修正した FITS ファイルを作成しておくのではなく, データ請求の毎に修正を施すのは,

- ・常に最新の修正情報を反映するため,
- ・正しくない「修正」を施したデータを保持し提供してしまうことを極力避けるため,
- ・観測所保管データやバックアップデータとの直接の比較照合を行えるようにするため,

である. これらの修正情報は WEB 上の各フレーム情報ページ (検索結果一覧の各フレームの通し番号部を

*15 <https://stars2.naoj.hawaii.edu/>

*16 http://hasc.hiroshima-u.ac.jp/envirom/skymon_summary.html

クリックすると表示される)に表示される。しかしながら、これまでデータ請求を行ってデータを取得する利用者は、フレーム毎の上記ページをいちいち見るか、取得した各ファイルの中身を見ない限り、FITSヘッダの修正が行われたかどうか分からない、という状況であった。また、請求したデータに関する様々な問題点(FITSヘッダ内の誤った情報:フレームID重複による付け替えなど)は、上記の各フレーム情報ページに表示されるだけの状態であった。そこで、データ請求の際に、FITSヘッダ修正と問題点の情報をまとめたファイルを添付することとした。このファイルは、「利用者+請求番号」.memo という名前で、「利用者+請求番号」のディレクトリ下に置かれる。内容の例を図30に示した。

6. SMOKA の運用と利用状況, 成果

SMOKAの運用は順調であり、SMOKAから取得したデータを用いた研究成果も多く生産されるようになっていく。以下に現時点でのSMOKAの公開データ量、利用状況、研究成果をまとめる。

6.1 SMOKA が公開するデータ量

SMOKAが公開している観測データの数・量を表3に示した。論文5の表2の値(2009年7月16日

現在)に比べて総データ量で1.6倍に増加している。SMOKAではこれ以外に環境データ(気象データ、モニタ画像、シーイングデータなど)、一部装置の観測野帳、観測ログ、早見画像などのデータも公開しており、また、公開時期に達しない観測データや環境データ等も保管している。増え続けるデータ量に対応すべく、磁気ディスク容量の増強などのハードウェア対策が必須であるが、効率(圧縮率、圧縮/解凍時間)の高いデータ圧縮方法の検討も必要であろう。

6.2 SMOKA の利用状況

SMOKAの運用開始(2001年6月)から現在に至るまでの月毎のデータ請求量の推移を図31に示した。図には最小二乗法によって求めたトレンド線も示した。データ請求が順調に増えていることがわかる。また図32は、Suprime-Camとその他の観測装置で色分けした年毎の請求フレーム数の推移である。Suprime-Camフレームの請求数はその他の観測装置に比べて圧倒的に多いことがわかる。

6.3 SMOKA による研究成果

SMOKAから取得したデータを用いた研究論文(主要論文誌掲載の査読論文)の推移を図33に示した。依然として(論文5図23参照)、すばる望遠鏡のSuprime-Camデータを用いたものが多い状況が続い

<p>●ヘッダ修正があるフレームの場合: KCD144222 :: FITS HEADER modification : added records = 2, replaced values = 0 KCD144223 :: FITS HEADER modification : added records = 16, replaced values = 0 KCD144224 :: FITS HEADER modification : added records = 16, replaced values = 0</p> <p>●問題点があるフレームの場合: SUPZ00335165 SMOKA renamed FRAME_ID to Z-sequence, because the last digit is different from CCD-chip No.</p>	<p>●ヘッダ修正と問題点がともにあるフレームの場合: KCD062293A :: FITS HEADER modification : added records = 2, replaced values = 0 SMOKA added 'A' to FRAME_ID because of FRAME_ID duplication.</p> <p>●ヘッダ修正も問題点もないフレームの場合: SUPA00344266 -- NONE. SUPA00344267 -- NONE.</p>
---	---

図30: ヘッダ修正と問題点の情報をまとめたメモファイルの内容例。それぞれの場合で表記の仕方を変えている。

SMOKA が公開している観測データ量

2011年11月2日現在

観測所	データ占有期間	公開フレーム数	公開データ量
すばる望遠鏡	18ヶ月	1,762,853	19,390 GB
岡山天体物理観測所	2年	255,459	2,497 GB
木曾観測所	1年	195,527	1,160 GB
東工大 MITSuME	1年	2,343,444	4,819 GB
東広島天文台	18ヶ月	26,118	437 GB
	計	4,583,401	28,303 GB

表3: SMOKAが公開している観測データ量。

SMOKAが2011年11月2日現在で公開している観測データのフレーム数とデータ量を観測所毎に示した。

ているが、他の様々な観測装置のデータを用いた論文もある。また、それらの分類(論文中での SMOKA の位置づけ/研究分野)を図 34 に示した。SMOKA から取得したデータは、論文中で補助的に用いられていることが多いが、主要なデータとして用いられている場合や SMOKA のデータのみが用いられている場合も相当数あることがわかる。また、研究分野として、遠方銀河や宇宙論が多いことがわかるが、これは、Suprime-Cam データを用いた研究論文数が多いことと相関しているものと思われる。

7. まとめ

我々は、すばる望遠鏡、岡山天体物理観測所 188 cm 望遠鏡、および東京大学木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡、東広島天文台 かなた望遠鏡、MITSuME 望遠鏡によって取得された観測データを公開するアーカイブシステム SMOKA を開発し、運用を行っている。SMOKA を介して利用者がより効率的にデータを取得し、天文学的成果につなげられるよう、これまで様々な開発・改良を行ってきた。

本論文では、Suprime-Cam による観測データを対象とした既知の太陽系移動天体検索機能の再開発に

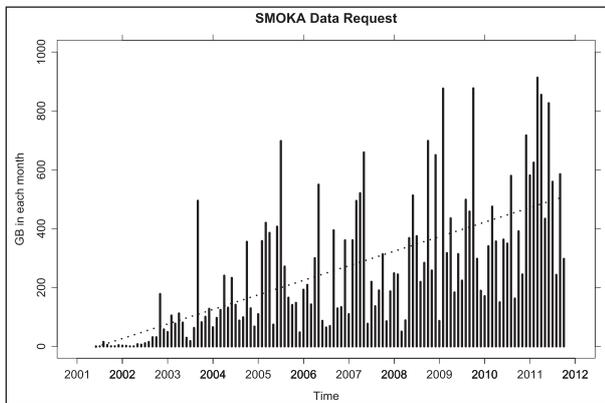


図 31: SMOKA データ請求量の推移。データ請求量を SMOKA の稼働開始(2001 年 6 月)から月毎に示した図。点線は最小二乗法によって求めたトレンド線。

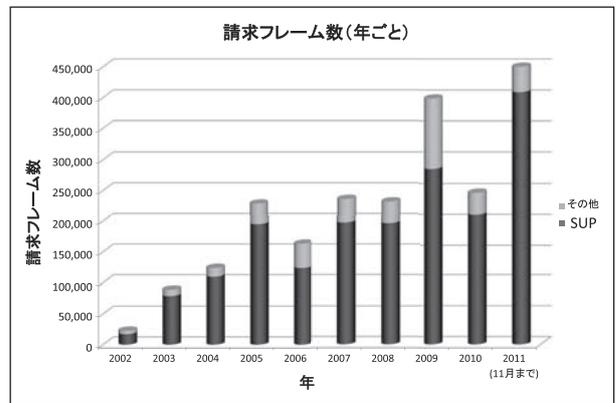


図 32: SMOKA データ請求フレーム数の年ごとの推移。Suprime-Cam とその他の観測装置で色分けしてある。

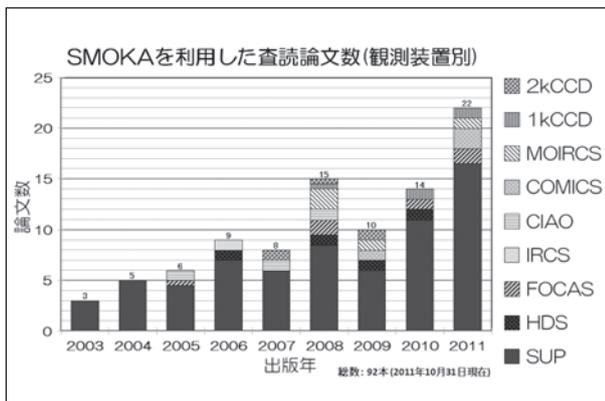


図 33: SMOKA による研究成果。SMOKA から取得したデータを用いた主要論文誌掲載論文数の推移を示した。観測装置で分類した積み上げ棒グラフとしてある。なお、1 本の論文が複数装置のデータを用いている場合には、それぞれの観測装置に 1/(装置数)を割り振った。

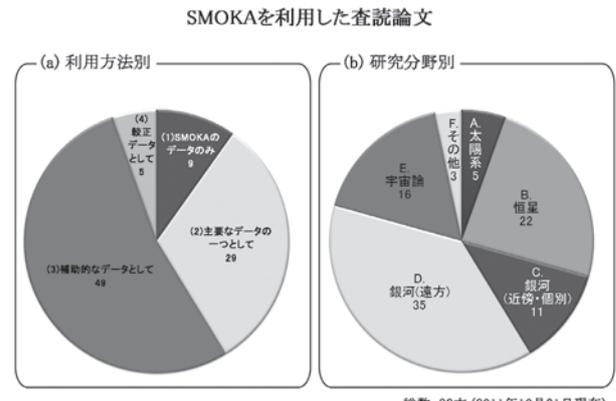


図 34: SMOKA を利用した査読論文の分類。2011 年 10 月 31 日現在で出版されているか、出版が決まっている論文 92 本について下記の分類を行った。

- (a) 利用方法による分類:
- (1) SMOKA データのみ利用した研究,
 - (2) SMOKA データを主要なデータの一つとした研究,
 - (3) SMOKA データを補助的なデータとして利用した研究,
 - (4) SMOKA データを較正データとして利用した研究。
- (b) 研究分野による分類:
- A. 太陽系, B. 恒星, C. 銀河(近傍・個別), D. 銀河(遠方), E. 宇宙論, F. その他。

ついて論じた。検索対象天体は、JPL/HORIZONSでデータを保持している天体のうち、彗星と天体番号が確定している小惑星であり、これらのデータの更新手順を確立し、定常運用を開始した。論文5で論じた重複領域検索機能については、利用者が直感的に理解し易いユーザインタフェースを開発し、実装した。また、木曾の2kCCDによる観測フレームについてもHEALPixインデックス化を施し、Suprime-Camと同様に検索可能とした。また、木曾観測所の1kCCD、2kCCDのFITSヘッダ記載の位置情報は精度が不十分であったが、位置較正を行い、利用の促進を図った。さらに、新観測装置(ISLE, KOOLS, HOWPol, HiCIAO, FMOS)データのSMOKAへのデータの組み込みも行った。特にすばる望遠鏡の2観測装置(HiCIAO, FMOS)については、データ組み込み方法の改変を行い、システム運用の効率化に成功した。

利用者が増え、天文学的成果も着実に上がっているSMOKAであるが、各章で述べた通り、解決すべき課題がなお残されている。蓄積するデータが増大する中、天文データアーカイブを利用した研究成果をより効率的に得るためにも、これらの課題に精力的に取り組むことが必要である。

謝辞

本研究の開発作業にあたっては、国立天文台天文データセンターDB/DAプロジェクトの計算機資源を活用した。移動天体検索機能の開発にあたっては、岡山天体物理観測所の黒田大介氏の助言に感謝する。また新観測データの組み込みに際して、岡山天体物理観測所の泉浦秀行氏、柳澤顕史氏、広島大学の川端弘治氏、ハワイ観測所の寺田宏氏、田村直之氏、岩田生氏、工藤智幸氏、国立天文台(三鷹)の鈴木竜二氏の多大なる助力に感謝する。また、各観測所の観測データの転送等、運用面で広島大学の吉田道利氏にはたびたびご協力いただいた。その他、ハワイ観測所、岡山天体物理観測所、東京大学木曾観測所、東京工業大学河合研究室、広島大学宇宙科学センターの皆様にはSMOKA運用および開発にご協力いただいていることに感謝する。最後に、有益な助言を与えてくださった査読者に感謝する。本研究は、国立天文台天文データセンター開発経費の援助を得て行った。

参考文献

- [1] 馬場肇, 安田直樹, 市川伸一, 八木雅文, 岩本信之, 高田唯史, 洞口俊博, 多賀正敏, 渡邊大, 奥村真一郎, 小澤友彦, 山本直孝, 濱部勝: すばる望遠鏡公開データアーカイブシステムの開発, 国立天文台報, 6, 23-36 (2002).
- [2] 山本直孝, 野田祥代, 多賀正敏, 小澤友彦, 洞口俊博, 奥村真一郎, 古莊玲子, 馬場肇, 八木雅文, 安田直樹, 高田唯史, 市川伸一: すばる望遠鏡公開データアーカイブシステムの開発 2, 国立天文台報, 6, 79-100 (2003).
- [3] 榎基宏, 多賀正敏, 小澤友彦, 野田祥代, 奥村真一郎, 吉野彰, 古莊玲子, 馬場肇, 洞口俊博, 高田唯史, 市川伸一: すばる望遠鏡公開データアーカイブシステムの開発 3, 国立天文台報, 7, 57-84 (2004).
- [4] 出田誠, 榎基宏, 小澤友彦, 吉野彰, 仲田史明, 奥村慎一郎, 山本直孝, 古莊玲子, 矢治健太郎, 山田善彦, 八木雅文, 洞口俊博, 高田唯史, 市川伸一: すばる望遠鏡公開データアーカイブシステムの開発 4, 国立天文台報, 8, 59-84 (2005).
- [5] 山田善彦, 小澤友彦, 西澤淳, 古莊玲子, 西村高德, 榎基宏, 吉野彰, 古澤順子, 高田唯史, 市川伸一: すばる望遠鏡公開データアーカイブシステムの開発 5, 国立天文台報, 12, 53-78 (2009).
- [6] K. S. Long, S. A. Baum, K. Borne, D. Swade: The Hubble Space Telescope Data Archive, ADASS III, ASP Conf. Ser., 61, eds. D. R. Crabtree, R. J. Hanisch, and J. Barnes, 151-154 (1994).
- [7] G. B. Berriman, J. C. Good, C. J. Lonsdale: The Infrared Science Archive (IRSA) at IPAC: Moving Towards the NVO, BAAS, 32, 1601 (2000).
- [8] F. Ochsenbein, P. Bauer, J. Marcout: The VizieR database of astronomical catalogues, A&AS, 143, 23-32 (2000)
- [9] C. Yamauchi, C., S. Fujishima, N. Ikeda, K. Inada, M. Katano, H. Kataza, S. Makiuti, K. Matsuzaki, S. Takita, Y. Yamamoto, I. Yamamura: AKARI-CAS Online Service for AKARI All-Sky Catalogues, PASP, 123, 852 (2011).
- [10] T. Kotani, N. Kawai, K. Yanagisawa, J. Watanabe, M. Arimoto, H. Fukushima, T. Hattori, M. Inata, H. Izumiura, J. Kataoka,

- H. Koyano, K. Kubota, D. Kuroda, M. Mori, S. Nagayama, K. Ohta, T. Okada, K. Okita, R. Sato, Y. Serino, Y. Shimizu, T. Shimokawabe, M. Suzuki, H. Toda, T. Ushiyama, Y. Yatsu, A. Yoshida, M. Yoshida: MITSuME - Multicolor Imaging Telescopes for Survey and Monstrous Explosions, *Il Nuovo Cimento C*, 28, 755 (2005).
- [11] S. Miyazaki, Y. Komiyama, M. Sekiguchi, S. Okamura, M. Doi, H. Furusawa, M. Hamabe, K. Imi, M. Kimura, F. Nakata, N. Okada, M. Ouchi, K. Shimasaku, M. Yagi, N. Yasuda: Subaru Prime Focus Camera -- Suprime-Cam, *PASJ*, 54, 833 (2002).
- [12] 吉野彰, 山田善彦, 仲田史明, 榎基宏, 高田唯史, 市川伸一: すばる望遠鏡 Suprime-Cam データの位置較正, *国立天文台報*, 10, 19-37 (2007).
- [13] K. M. Gorski, E. Hivon, A. J. Banday, B. D. Wandelt, F. K. Hansen, M. Reinecke, M. Bartelmann: HEALPix: A Framework for High-resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere, *ApJ*, 622, 759-771 (2005).
- [14] S. Yoshida, T. Aoki, T. Soyano, K. Tarusawa, M. Sekiguchi, M. Doi, N. Kashikawa, S. Okamura, K. Shimasaku, M. Yagi, N. Yasuda: CCD Cameras for the Kiso 105 cm Schmidt Telescope, *Future Utilisation of Schmidt Telescope*, Proc. of IAU Coll. 148, eds. J. M. Chapman, R. D. Cannon, S. J. Harrison and B. Hidayat, 33-37 (1994).
- [15] N. Itoh, T. Soyano, K. Tarusawa, T. Aoki, S. Yoshida, T. Hasegawa, Y. Yodomaru, Y. Nakada, and S. Miyazaki: A Very Wide-Field CCD Camera for Kiso Schmidt Telescope, *Publ. Natl. Astron. Obs. Japan*, 6, 41-48 (2001).
- [16] K. Yanagisawa, Y. Shimizu, K. Okita, S. Nagayama, Y. Sato, H. Koyano, T. Okada, I. Iwata, F. Uraguchi, E. Watanabe, M. Yoshida, S. Okumura, H. Nakaya, T. Yamamuro: ISLE: a general purpose near-infrared imager and medium-resolution spectrograph for the 1.88-m telescope at Okayama Astrophysical Observatory, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*, eds. I. S. McLean, and M. Iye, Proc. SPIE, 6269, 62693 (2006).
- [17] H. Ohtani, T. Ishigaki, H. Maemura, T. Hayashi, M. Sasaki, S. Ozaki, T. Hattori, K. Aoki, H. Sugai: The Kyoto Tridimensional Spectrograph I., *Optical Astronomical Instrumentation*, ed. S. D'Odorico, Proc. SPIE, 3355, 750-761 (1998).
- [18] T. Ishigaki, T. Hattori, T. Hayashi, H. Ohtani, M. Sasaki, H. Maemura, D. Ozaki, H. Sugai, M. Ishii: Low-Ionization Emission-Line Regions around the Nucleus of the Seyfert Galaxy NGC 1068, *PASJ*, 56, 723 (2004).
- [19] K. S. Kawabata, O. Nagae, S. Chiyonobu, H. Tanaka, H. Nakaya, M. Suzuki, Y. Kamata, S. Miyazaki, K. Hiragi, H. Miyamoto, M. Yamanaka, A. Arai, T. Yamashita, M. Uemura, T. Ohsugi, M. Isogai, Y. Ishitobi S. Sato: Wide-field One-shot Optical Polarimeter: HOWPol, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*, eds. I. S. McLean, and M. M. Casali, Proc. SPIE, 7014, 70144 (2008).
- [20] M. Tamura, K. W. Hodapp, H. Takami, L. Abe, H. Suto, O. Guyon, S. Jacobson, R. Kandori, J. Morino, N. Murakami, V. Stahlberger, R. Suzuki, A. Tavrov, H. Yamada, J. Nishikawa, N. Ukita, J. Hashimoto, H. Izumiura, M. Hayashi, T. Nakajima, T. Nishimura: Concept and science of HiCIAO: high contrast instrument for the Subaru next generation adaptive optics, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*, eds. I. S. McLean, and M. Iye, Proc. SPIE 6269, 28 (2006).
- [21] K. W. Hodapp, M. Tamura, R. Suzuki, S. Jacobson, V. Stahlberger, H. Yamada, H. Takami, O. Guyon, L. Abe: Design of the HiCIAO instrument for the Subaru Telescope, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*,

- eds. I. S. McLean, and M. Iye,
Proc. of the SPIE, 6269, 123 (2006).
- [22] K. W. Hodapp, R. Suzuki, M. Tamura, L. Abe, H. Suto, R. Kandori, J. Morino, T. Nishimura, H. Takami, O. Guyon, S. Jacobson, V. Stahlberger, H. Yamada, R. Shelton, J. Hashimoto, A. Tavrov, J. Nishikawa, N. Ukita, H. Izumiura, M. Hayashi, T. Nakajima, T. Yamada, T. Usuda:
HiCIAO: the Subaru Telescope's new high-contrast coronagraphic imager for adaptive optics, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*, eds. I. S. McLean, and M. M. Casali, Proc. SPIE, 7014, 42 (2008).
- [23] R. Suzuki, T. Kudo, J. Hashimoto, J. Carson, S. Egner, M. Goto, M. Hattori, Y. Hayano, K. Hodapp, M. Ito, M. Iye, S. Jacobson, R. Kandori, N. Kusakabe, M. Kuzuhara, T. Matsuo, M. McElwain, J. Morino, S. Oya, Y. Saito, R. Shelton, V. Stahlberger, H. Suto, H. Takami, C. Thalmann, M. Watanabe, H. Yamada, M. Tamura:
Performance characterization of the HiCIAO instrument for the Subaru Telescope, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III*, eds. McLean, I. S., and S. K. Ramsay, and H. Takami, Proc. SPIE 7735, 101 (2010).
- [24] M. Kimura, T. Maihara, F. Iwamuro, M. Akiyama, N. Tamura, G. B. Dalton, N. Takato, P. Tait, K. Ohta, S. Eto, D. Mochida, B. Elms, K. Kawate, T. Kurakami, Y. Moritani, J. Noumaru, N. Ohshima, M. Sumiyoshi, K. Yabe, J. Brzeski, T. Farrell, G. Frost, P. R. Gillingham, R. Haynes, A. Moore, R. Muller, S. Smedley, G. Smith, D. G. Bonfield, C. B. Brooks, A. R. Holmes, E. Curtis Lake, H. Lee, I. J. Lewis, T. R. Froud, I. A. Tosh, G. F. Woodhouse, C. Blackburn, R. Content, N. Dipper, G. Murray, R. Sharples, D. J. Robertson:
The Fibre Multi-Object Spectrograph (FMOS) for Subaru Telescope, PASJ, 62, 1135 (2010).
- [25] E. Bertin, and S. Arnouts:
SExtractor, Software for source extraction, A&ApS, 117, 393-404 (1996).
- [26] D. J. Mink:
WCSTools: Image World Coordinate System Utilities, ADASS VI, ASP Conf. Ser., 125, eds. G. Hunt, and H. E. Payne, 249-252 (1997).
- [27] N. Zacharias, C. Finch, T. Girard, N. Hambly, G. Wycoff, M. I. Zacharias, D. Castillo, T. Corbin, M. DiVittorio, S. Dutta, R. Gaume, S. Gauss, M. Germain, D. Hall, W. Hartkopf, D. Hsu, E. Holdenried, V. Makarov, M. Martinez, B. Mason, D. Monet, T. Rafferty, A. Rhodes, T. Siemers, D. Smith, T. Tilleman, S. Urban, G. Wieder, L. Winter, and A. Young:
The Third US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC3), AJ, 139, 2184 (2010).
- [28] D. G. Monet, S. E. Levine, B. Canzian, H. D. Ables, A. R. Bird, C. C. Dahn, H. H. Guetter, H. C. Harris, A. A. Henden, S. K. Leggett, H. F. Levison, C. B. Luginbuhl, J. Martini, A. K. B. Monet, J. A. Munn, J. R. Pier, A. R. Rhodes, B. Riepe, S. Sell, R. C. Stone, F. J. Vrba, R. L. Walker, G. Westerhout, R. J. Brucato, I. N. Reid, W. Schoening, M. Hartley, M. A. Read, and S. B. Tritton:
The USNO-B Catalog, AJ, 125, 984-993 (2003).
- [29] H. Izumiura:
HIDES: a High Dispersion Echelle Spectrograph, *Observational Astrophysics in Asia and its Future, 4th East Asian Meeting on Astronomy (4th EAMA) - held 3-10 Feb., 1999 in Kunming, China*, ed. P. S. Chen., Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, 77 (1999).
- [30] T. Takata, R. Ogasawara, K. Kawarai, and T. Yamamoto:
Data archive and Database System of the SUBARU Telescope, *Observatory Operations to Optimize Scientific Return*, ed. P. J. Quinn, Proc. SPIE, 3349, 247-254 (1998).
- [31] T. Takata, R. Ogasawara, G. Kosugi, Y. Mizumoto, S. Ichikawa, N. Yasuda, M. Taga, M. Yagi, T. Horaguchi, H. Baba, M. Watanabe, T. Ozawa, M. Hamabe, T. Yamamoto, and K. Kawarai:
STARS (Subaru Telescope archive system) for the Effective Return from Subaru Telescope, *Observatory Operations to Optimize Scientific Return II*, ed. P. J. Quinn, Proc. SPIE, 4010,

181-189 (2000).

[32] P. T. Wallace:

The SLALIB Library, ADASS III, ASP Conf.

Ser. 61, eds. D. R. Crabtree, R. J. Hanisch,

and J. Barnes, 481-484 (1994).