

すばる秋の学校2011 Suprime-Cam 班

移動天体検出編*

文責：寺居 剛（国立天文台ハワイ観測所）

2011年11月29日 – 12月2日

1 はじめに

本マニュアルでは、Suprime-Cam のデータから太陽系小天体を検出するための解析手法について解説する。太陽系小天体（Small Solar System Bodies）とは惑星・準惑星・衛星を除いた太陽を公転する天体の総称で、小惑星や彗星などが該当する。中でも、火星軌道と木星軌道間の小惑星帯（日心距離 2.1–3.3 AU）に位置するメインベルト小惑星（main-belt asteroids）や海王星軌道以遠の領域（日心距離 > 30 AU）に分布する太陽系外縁天体（trans-Neptunian objects；Kuiper belt 天体とも呼ばれる）が大勢を占める。

太陽系小天体は地球との相対速度によって天球上を時々刻々と動いて見える（小天体自身の公転運動のせいで動くとは誤解されがちだが、実際は地球の公転が支配的）。そのため、それらは画像上で移動天体（moving objects）として認識される。太陽系小天体を見つけるには、同じ領域を時間をおいて複数回撮像し、背景の恒星などに対して動いている天体を探せばよい。

天球上での移動速度は天体の軌道および地球との位置関係によって異なる。例えば衝（太陽の反対点）の位置を観測した場合、典型的な移動速度はメインベルト小惑星で $\sim 30\text{--}45$ arcsec/hr、外縁天体で ~ 3 arcsec/hr である。逆に言えば、移動速度を測定することで天体の大まかな軌道を推定することができる。ただし、衝から離れるほど軌道の違いによる速度差が小さくなり、分離は困難になる。

多くの太陽系小天体は黄道面（ecliptic plane）に沿った軌道を持つため、移動方向は黄道の向きに近いものが多い。また、一般的には地球の方が公転速度が大きいので、

*本マニュアルはすばる秋の学校 2011 開催後に若干の修正を加えたものである。

観測領域が衝から大きく（メインベルト小惑星なら 50° 程度）離れていなければ、小天体は負の黄経方向に動く。黄道面の赤道に対する見かけの傾きは 23.4° 以下なので（図 1 参照）、基本的には西向きに移動すると思ってもらって差支えない。

すばる望遠鏡 + Suprime-Cam による観測では、高い集光力と広い視野を生かして多くの太陽系小天体を検出することが可能である。黄道面領域を撮像すると、1 視野で 100 個程度の小惑星が検出される。しかもそのほとんどは未知の天体である。本実習を通して、移動天体検出の面白さと新発見の喜びを体験してもらえれば幸いである。

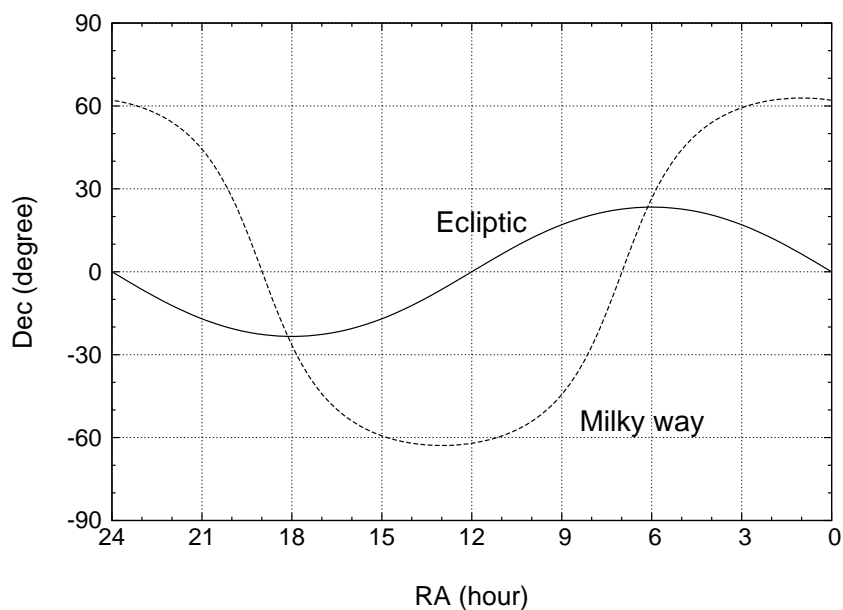


図 1: 赤道座標系における黄道と銀河面。

なお、本マニュアルではすばる秋の学校 2011 にて Suprime-Cam データの基本的な処理方法を習得した受講者を対象として解説する。また、ds9、IRAF、SExtractor、SDFRED2、WCSTools の使用できる環境での作業を前提とする。各ソフトウェアの動作は以下の version で確認されている。

IRAF :	2.14.1
ds9 :	6.1.2
SExtractor :	2.8.6
WCSTools :	3.8.4

2 使用するデータ

今回の実習では以下のデータを解析する。

EXP ID : SUPE01127410 – SUPE01127480
観測日 : 2009年9月20日 (UT)
対象天体 : A2537 (銀河団)
フィルター : i' バンド ($0.77\mu\text{m}$)
露出時間 : 240 秒

EXP ID	赤経 (h:m:s)	赤緯 (d:m:s)	時刻 (UT)
SUPE01127410	23:08:25.729	-02:10:58.85	08:29:06
SUPE01127420	23:08:23.751	-02:10:41.64	08:33:41
SUPE01127430	23:08:21.504	-02:10:47.97	08:38:25
SUPE01127440	23:08:20.045	-02:11:13.90	08:43:05
SUPE01127450	23:08:20.052	-02:11:48.10	08:47:43
SUPE01127460	23:08:21.516	-02:12:14.05	08:52:19
SUPE01127470	23:08:23.755	-02:12:19.85	08:56:57
SUPE01127480	23:08:25.715	-02:12:03.10	09:01:38

「対象天体」を見て分かるように、これらデータは太陽系小天体の観測で撮られたものではない。しかし以下の条件を満たしており (図 1 参照) 太陽系小天体検出にも適したデータとなっている。

- 領域が黄道面に近い (黄緯 $+3^\circ$)
- 領域が衝の位置に近い (黄経差 -10°)
- 領域が銀河面から遠い (銀緯 -55°)
- フィルターが適切 (i' バンド)
- 観測時間 (約 30 分間) 撮像回数 (8 回) 撮像間隔 (約 5 分) が適切
- 前日 (2009-09-19 UT) に同じ領域が V バンドで撮像されている

メインベルト小惑星やそれより外側 (= 低速) の小天体であれば、2 日連続で取得されたデータの同一視野内に写っている場合も多い。まだ発見されていない小天体の位置座標を 2 日分測定すると、IAU の太陽系小天体カタログに登録 (仮符号を取得) することができる。軌道が確定されれば、その天体に名前を付けることもできる。

前日 (2009-09-19 UT) に同領域を観測したデータの詳細は以下の通りである。

EXP ID : SUPE01125570 – SUPE01125630
観測日 : 2009年9月19日 (UT)
対象天体 : A2537
フィルター : Vバンド (0.55 μ m)
露出時間 : 240 秒

EXP ID	赤経 (h:m:s)	赤緯 (d:m:s)	時刻 (UT)
SUPE01125570	23:08:26.519	-02:11:30.72	08:12:23.249
SUPE01125580	23:08:25.268	-02:10:51.95	08:17:03.181
SUPE01125590	23:08:22.426	-02:10:41.89	08:21:44.822
SUPE01125600	23:08:20.167	-02:11:09.27	08:26:26.931
SUPE01125610	23:08:20.165	-02:11:52.60	08:31:07.431
SUPE01125620	23:08:22.429	-02:12:19.75	08:35:49.407
SUPE01125630	23:08:25.245	-02:12:10.06	08:40:27.279

本実習ではまず 2009/09/20 (UT) のデータを解析して未知の小惑星を検出し、それらを 2009/09/19 (UT) のデータからも探して両日の位置座標を決定することを最終ゴールとする。解析は CCD チップごとに行い、各人が 1 枚ずつを担当する。検出された小天体が前日のデータにも写っている可能性が高い、nausicaa (SUPA*0)、kiki (SUPA*1)、sophie (SUPA*3)、sheeta (SUPA*4)、satsuki (SUPA*5) のいずれかを選んで解析してもらいたい。

6 chihiro	7 clarisse	2 flo	1 kiki	0 nausicaa
8 ponyo	9 san	5 satsuki	4 sheeta	3 sophie

3 データ解析

移動天体検出とは、基本的には同じ領域を撮像した画像を比較し、位置が変化する天体を見つけることである。しかし、対象天体、観測方法、データ量、さらには個人の好みによってその手法は千差万別である。それらを大まかに分類すると、

- ① 画像を連続的に表示させ、移動天体を目視で見つける（ブリンク法）
- ② ソフトウェアを用いて移動天体を自動検出する
- ③ 移動天体を見つけやすいように画像を処理し、目視／自動検出で探す
- ④ 画像をずらしながら重ね合わせる（シフト・アンド・アッド法）

本実習では、①のブリンク法を採用する。ブリンク法は古くから行われてきた最も基本的な手法で、現在でもアマチュアからプロの研究者にまで幅広く利用されている。この方法は画像を順番に表示させて、後はひたすら目で探すという極めてシンプルな仕組みではあるが、実は暗い移動天体を素早く検出するという点において最も優れた方法である。その理由は目視で探すというところにある。これは実際やってみるとよく分かるのだが、人間の目（というか脳）は非常に高性能な画像解析マシンである。特に動く物を捉える能力は抜群に高い。ソフトウェアによる自動検出では誤検出が多くなってしまふような暗い天体でも、目視では容易に天体を判別することができる。今回のように、データの条件（領域、枚数、時間間隔 etc.）が良く、大量のデータを扱う必要が無い場合、ブリンク法は大変適した手法であると言える。

ただし、ブリンク法は次々と切り替わる画像をじっと見続けなければならないため、かなり疲れるし、時間もかかる。また、見落としをしてしまったり、個人差が生じるというデメリットもある。はっきり言って、筆者はこの方法をあまり好きではない（軽い拷問だと思ってしまう）。しかしそうは言っても、少なくとも本実習には適した方法であることは間違いない。そこで、少しでも作業が楽になるように上記③の要素を採り入れる。すなわち、少し画像を加工して移動天体を探しやすくする。これにより、費やされる労力と時間を大きく削減できると考える。どのような加工をすれば良いかはアイデアの出し所である。皆さんも一度考えてみてほしい。

それではいよいよ解析作業に移る。解析は以下のような手順で行う。

1. 一次処理
2. WCS 較正
3. 位置合わせ
4. 背景天体マスク
5. 移動天体検出

1章でも述べたが、以下の説明では ds9、IRAF、SExtractor、SDFRED、WCSTools の使用を前提としている。特に 3.以降は IRAF 上での作業となっている。もちろん各人の判断で他のソフトウェアを使ってもらっても構わないが、その場合はスタッフの対応は限られたものになってしまうのでご了承ください。

なお、IRAF 上で作業する際、IRAF タスクや login.cl に登録されているもの以外のコマンドを使用する時は先頭に「！」を付けることをお忘れなく（例：ecl> !whoami）。

3.1 一次処理

まずはこれまでの実習で行った、SDFRED による基礎的な画像処理を行う。ただし、今回はモザイクングはしないため、PSF 測定・PSF 合わせ・組み合わせは必要無いし、AG probe の影 / 悪い部分のマスクも省略してよい。また、L.A.Cosmic による宇宙線除去も時間短縮のためにカットする（本来は行う方が良い）。

flat 画像に関しては、*i'* バンドは 2009/09/20 (UT) の object データから、*V* バンドは 2009/09/19 (UT) の object データから、それぞれ object flat を作成することをお勧めする。

したがって、SDFRED を使って行う作業は以下の通りである。

- (1) 画像ファイル名変換および画像確認 (namechange.csh)
- (2) bias 引きおよび overscan 切り取り (overscansub.csh)
- (3) flat 作り (mask_mkflat_HA.csh)
- (4) 感度補正 (ffield.csh)
- (5) 歪補正および微分大気差補正 (distcorr.csh)
- (5) sky 差し引き (skysb.csh)

作業自体はこれまでにやってきたことと同じである。復習を兼ねてささっと済ませていただきたい。

3.2 WCS 較正

次に WCSTools および SExtractor を使って RA・Dec の較正を行う。これも実習前半に行った作業と全く同じである。ただし、検出天体数が 200 個を下回るような場合は SExtractor のパラメータファイル (astmt.sex) 中の DETECT THRESH と DETECT MINAREA を

調整し直すように。較正したデータの名前には末尾に「w」が付加されるが (sgfTo_RH090919object0??_*.fits)、あまり見栄えがよろしくない (と個人的には思う) ので、先頭に「w」が付くように (wsgfTo_RH090919object0??_*.fits) 名前を変えておこう (そのままでいいけれど)。

```
% rename sgf wsgf sgfTo_RH090*w.fits
% rename w.fits .fits wsgfTo_RH090*w.fits
```

学校後追記：

imwcs 実行時に -o オプションであらかじめ「w」をファイル名の先頭に付けた場合は、上記の作業は必要ない。

ここまで終わったら、ds9 に表示させて座標がカタログと一致していることを確かめよう。なお、astmt.sex と astmt.param は後の作業でも使うので、削除しないように。

3.3 位置合わせ

先にも述べた通り、ここからの作業は IRAF 上で進める。ds9 も立ち上げておこう。

```
% ds9 -fifo /dev/imt2 &
```

mkiraf をした (login.cl が存在する) ディレクトリに移動して、IRAF を起動する。

例)

```
% cd /mfs01/subaru00
% cl
```

IRAF を起動したら、wsgfTo_RH090919object0??_*.fits が置いてあるディレクトリに移動し、以下のタスク登録を行う (もしくは起動前に login.cl に追記しておく)。

```
ecl> task $supmatch = /mfs03s/teraity/modet/supmatch.cl
ecl> task $blink = /mfs03s/teraity/modet/blink.cl
```

移動天体を (特に目視で) 探すためには、画像間で RA・Dec をきっちり合わせて背景天体 (恒星・銀河) が同じ位置になるようにすると見つけやすい。この作業は supmatch.cl を使用することにより自動で行うことができる。スクリプト中で行っている内容は以下の通りである。

- (1) ヘッダーから RA・Dec を読んで、画像間のだいたいの位置ずれを把握
- (2) SExtractor で天体位置を測定 (ここで astmt.sex と astmt.param を使う)
- (3) 天体の位置が画像間で最も合うようなずれ量を算出
- (4) 画像をひと回り大きな台紙 (4k×6k) に貼りつける
- (5) 座標をシフトさせる

始めに位置合わせをする画像のリストを作成する。

```
ecl> ls -l wsgfTo_RH090*.fits > match.lis
```

次に、mkimage タスクおよび mkheader タスクを使用するためにそれらが入っているパッケージをロードする。mkimage は noao.imred.ccdred.ccdtest の中に、mkheader は noao.artdata の中にある。

```
ecl> noao
noao> imred
imred> ccdred
ccdred> ccdtest
ccdtest> artdata
```

そして supmatch.cl を実行する。

```
artdata> supmatch
```

「Frame list > 」というメッセージが出るので、リスト名 (match.lis) を入力して Enter を押す。すると処理が開始され、「mwsfTo_RH090*.fits」という名前の画像が作成される。最後に処理後の画像を ds9 などに表示させて、ちゃんと位置が揃っているかチェックする。

学校後追記：

supmatch.cl は秋の学校で使用したデータでのみ動作を確認しており、他の Suprime-Cam データに対して動作を保証するものではない。

3.4 背景天体マスク

画像の位置合わせが終われば、もうブリンク法で移動天体を探していくことは十分可能である (試しにやってみてもいい)。しかしこのままでは目への負担がやや大きい。そこで画像にもう一処理加えて作業効率を向上させる。

ここでは背景天体 (恒星や銀河) にマスクをかけるという作業を行う。これにより画像を見ていく際に「移動天体か、背景天体か」という判断をする必要がなくなり、移動天体探しが随分と楽になる。

以下に具体的な処理作業について説明する。なお、ここでは例として satsuki チップを処理することとする。

始めに位置合わせをした全画像から中間値 (median) 画像を作成する。

```
ecl> imcombine mwsfTo_RH090919*_satsuki.fits median090919_satsuki.fits
combine=median reject=none
```


元の画像と median 画像をそれぞれ図 2 と図 3 に示す。median 画像からは移動天体やノイズが消え、S/N 比 (signal-to-noise ratio) が向上したことが分かる。なお、本来 median 画像を作成する時には画像間の相対 flux スケールを合わせなければならないが、本実習で使用するデータではその差は極めて小さいため (7%未満) 省略する。

この median 画像から mask 画像を作成する。基本的にはある基準となる値 (「閾値 (threshold) 」 という) より大きなカウントを持つ画素を天体と見なしてその部分をマスクとする。ここで問題になるのが閾値の設定である。閾値が高過ぎると PSF (point spread function) のすそ野 (天体の周縁淡くに広がる部分) が残ってしまうが、閾値を低くし過ぎるとスカイの部分まで消してしまうことになる (目視による検出であれば、天体周囲の光が残ってしまうことは実はそれほど大きな問題ではないが、自動検出をしようとするをやっかいなことになる)。

その対策として、median 画像を少しだけ “ぼかす” という処理を行う。具体的には画像に convolution (畳み込み) 処理を施して PSF サイズを大きくする。これにより明るい天体に関しては星像の大きさが広がり、スカイはより平坦化するため、適切な閾値を設定しやすくなる。この “ぼかし” 処理には Gaussian filter を使用する。

```
ecl> gauss median090919_satsuki.fits gauss090919_satsuki.fits 2.0
```

末尾の数字は convolution する Gauss 関数の σ 値である。だいたい 2.0 程度で良いと思うが、適宜調整してほしい。処理後の画像は図 4 のようになる。

この画像を使って mask 画像を作成する。imreplace タスクを使用し、天体の部分のカウント値を -70000 に、スカイのカウント値を 0 に置換する。

```
ecl> imcopy gauss090919_satsuki.fits mask090919_satsuki.fits
ecl> imreplace mask090919_satsuki.fits -70000 lower=40
ecl> imreplace mask090919_satsuki.fits 0 lower=-40000
```

図 5 のような画像が作成されるはずである。各処理で何が起こったのかは画像をチェックして確認してほしい。2 行目の 「lower=40」 が閾値である。閾値は画像によって適切な値が異なるため、背景天体だけを正しくにマスクできるよう値を調整すること。

最後に mask 画像を元画像に加算する (作成後の画像名はご自由に)。

```
ecl> imarith mwsfgTo_RH090919object062_satsuki.fits + mask090919_satsuki.fits
      rmwsfgTo_RH090919object062_satsuki.fits
      ⋮
ecl> imarith mwsfgTo_RH090919object069_satsuki.fits + mask090919_satsuki.fits
      rmwsfgTo_RH090919object069_satsuki.fits
```

図 6 のような画像ができていれば完了である。

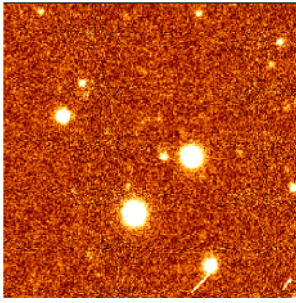


図 2: original 画像 (1'×1')

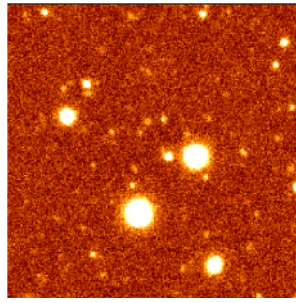


図 3: median 画像

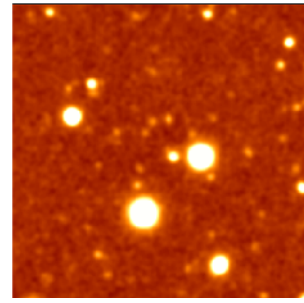


図 4: smoothed 画像

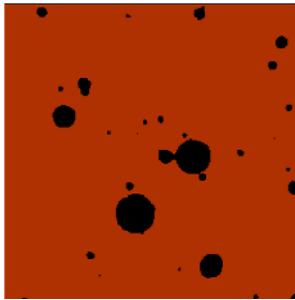


図 5: mask 画像

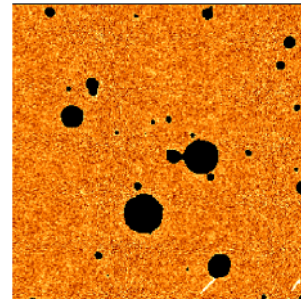


図 6: final 画像

3.5 移動天体検出

これでようやくお膳立てが整った。いよいよ移動天体探しに取り掛かる。

本章の始めにこの実習ではブリンク法で移動天体を探すと述べたが、まだピンと来ていない方もおられるかもしれない。まずはそれがどういうものかを知ってもらおう。

それでは背景天体をマスクした画像を ds9 に順番に表示してもらいたい。ただし、全体を表示させてもよく分からないので、一部を拡大して表示させる。例えば、

```
ecl> disp rmwsgfTo_RH090919object062_satsuki.fits[2000:2400,2000:2400] 1
      ⋮
ecl> disp rmwsgfTo_RH090919object069_satsuki.fits[2000:2400,2000:2400] 8
```

そして、ds9 のメニューバーの「Frames」にある「Brink Frames」もしくはボタンバーの「frame」にある「blink」を押すと（後者の方が便利）画像が順番に表示されるようになる（止めるには「single」を押す）。ここから動いている天体を見つければよい。

あとは画像中の天体が写っている範囲を端から順番に見ていくわけだが、いちいち上記のようなコマンドを打つのは面倒くさい。そこで便利ツールを用意した。

まずブリンクさせる画像のリスト「blink.lis」を作成する。

```
ecl> ls -l rmwsgfTo_RH090*_satsuki.fits > blink.lis
```

そして先ほどタスク登録した blink.cl を実行する。

```
artdata> blink
```

「X Y >」というプロンプトが出るので、例えば「2000 2000」と入力すると、各画像の [2000:2400, 2000:2400] の範囲が順番に ds9 に表示される (400×400 くらいが見やすそうなのでこのように設定した)。あとは ds9 の「blink」モードで順番に移動天体を探してってもらいたい。検出例を図 7 に示す。

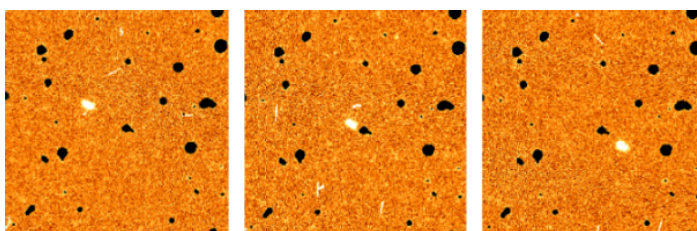


図 7: 本手法で検出された移動天体 (視野 $1' \times 1'$ 、左図から右図まで 32 分間)。

なお、9月20日(UT)のデータには既知の小惑星が4天体写っている(2011年11月現在)¹。それらの2009年9月20日8時30分(UT)における位置(計算値)を以下に示す。

Name	RA(J2000)	Dec(J2000)
(161520) 2004 SO32	23:08:16.6	-01:58:18
(179615) 2002 PJ26	23:07:33.5	-02:00:12
2006 WY183	23:07:41.8	-01:58:27
2009 QU6	23:09:30.8	-02:19:46

以上で紹介した方法はあくまで一例であり、必ずしもこれに従って解析する必要はないし、より良い方法があればそちらを使うべきである。本手法はS/N比を一切低下させることなく、効率的にブリンク法で移動天体を探せるという強みを持つが、外縁天体のような移動速度の遅い天体(正確には観測時間内にシーイングサイズ程度しか動かない天体)に対しては不向きである(背景天体と一緒にマスクされてしまう)。始めにも述べたように、対象とする天体、観測方法、データ量、あるいは背景天体の面密度などに応じて適切な手法を選んで使うことが肝要である。

¹Asteroid Observing Services <<http://asteroid.lowell.edu/cgi-bin/astplot>>.

4 測定

4.1 位置測定および測光

移動天体が検出できたら、それらの位置と等級を測定する。すでにお気付きの通り、メインベルト小惑星などの比較的移動速度が速い天体は星像が伸びる。そのため、ここでは銀河の検出・測定が得意な SExtractor を用いて移動天体の測定を行う。ただし、移動天体の星像は必ずしも恒星や銀河のように中心にピークが来るわけではない（ダブルピークになる場合もある）。中には SExtractor が誤った測定をする場合もある。その時は IRAF の phot（もしくは qphot）タスクなどを使って測光する。

始めに SExtractor のパラメータファイル（.sex）を編集する（本マニュアルでは source.sex とする）。以下の項目についてデフォルト値を変更する。

```
CATALOG_NAME      source.cat
CATALOG_TYPE      ASCII
PARAMETERS_NAME   source.param
                  :
DETECT_MINAREA    10
DETECT_THRESH     2.0
ANALYSIS_THRESH   2.0
                  :
FILTER            N
                  :
SATUR_LEVEL       45000.0
                  :
BACK_SIZE         4
                  :
CHECKIMAGE_TYPE   APERTURES
CHECKIMAGE_NAME   check.fits  （これはデフォルトのまま）
```

DETECT_MINAREA、DETECT_THRESH、ANALYSIS_THRESH に関してはこれが最適値というわけではないので、画像や測定天体に応じて適宜調整する。

source.param は以下のように設定する。

```
-----
X_IMAGE
Y_IMAGE
NUMBER
ALPHA_J2000
DELTA_J2000
FLUX_AUTO
FLUXERR_AUTO
FLAGS
-----
```

位置・光度測定は `mwsfTo_RH...` 画像で行う。この画像を `SExtractor` に掛けて光源を検出する。

```
% sex mwsfTo_RH...fits -c source.sex
```

実行後には2つのファイルが作成される。

一つは `check.fits` という画像ファイルである。`CHECKIMAGE_TYPE` を `APERTURES` に設定したので、`check.fits` には `MAG_AUTO` で測光する際に使用した楕円形の `aperture` が表示されている (`SExtractor` マニュアルの表紙絵みたいに)。この画像を見て、測定天体が検出されていることと、正しく測光されているかを確認する (`IRAF` の `tvmark` タスクで検出中心を確認するのもよい)。検出されていない場合は `DETECT_MINAREA` や `DETECT_THRESH` の値を小さくする。`aperture` が正しくない場合は…… あきらめよう (パラメータ設定で変わるかどうかは知らない)。

なお、`check.fits` をよく見ると、`aperture` の形状は移動天体の星像よりもやや移動方向に長過ぎるように感じると思うが、これは移動天体の星像 (「`trail`」と言う) は本当は楕円ではない (筆者は論文中で「`capsule-shaped`」と表現した) ためである。が、ここでは楕円で近似できると見なして測光しよう。

もう一つのファイルは光源リスト `source.cat` で、位置および光度の測定結果が記述されている。この例では `DETECT_THRESH = 2.0` という低い検出閾値を設定しているため、多数の光源が検出される。この中から測定天体を探すのはちょっと大変なので、またまた便利ツールを用意した。 `/mfs03s/teraity/modet/` に `search` という実行ファイルが置いてあるので、これを実行する。実行の際は光源リストファイルを引数にする (しなくても後で入力を求められるが)。

```
% /mfs03s/teraity/modet/search source.cat
```

「`X Y >`」というプロンプトが出るので、`X` 座標と `Y` 座標を入力する (両者の間にはスペースを入れる) と、その座標から 10 pixel 以内 (`Suprime-Cam` の場合は 2" 以内に相当する) にある光源の測定結果を表示する (無い場合は無いって言われる)。

測定が終わったら、座標は `WCSTool` の `xy2sky` コマンド (もしくは `SExtractor` の `ALPHA_J2000, DELTA_J2000`) で `RA・Dec` に変換し、等級は測光原点を求めて較正する。

2009年9月20日 (UT) の *i'*-band データは Sloan Digital Sky Survey (SDSS) のカタログを使って測光原点を算出する。SDSS の公開カタログ `Data Release 8 (DR8)` は以下の web ページから検索することができる。

<http://skyserver.sdss3.org/dr8/en/tools/search/>

ただし、Suprime-Cam の i' -band フィルターの応答関数は SDSS のそれとはやや異なるため、実際には 0.0–0.4 等のずれがある (図 8)。この差は天体のカラーに依存し、 $-0.4 < r_{SDSS} - i_{SDSS} < 2.5$ のカラーを持つ星では

$$i_{SDSS} - i_{SCam} = 0.10 (r_{SDSS} - i_{SDSS})$$

という式で近似される (Yagi et al. 2010)。

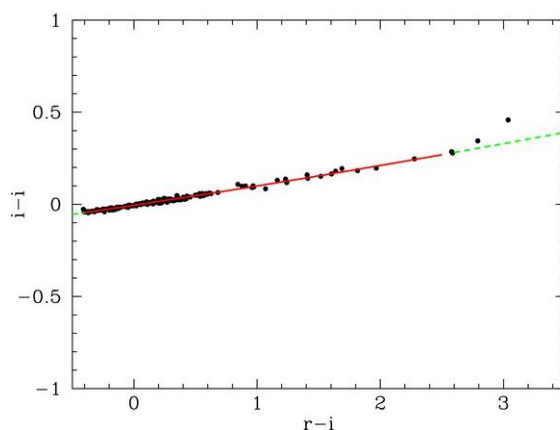


図 8: $r_{SDSS} - i_{SDSS}$ vs. $i_{SDSS} - i_{SCam}$ (Yagi et al. 2010).

また、2009 年 9 月 19 日 (UT) の V -band データは以下の標準星データ (SA113) を用いて較正する。

EXP ID	赤経 (h:m:s)	赤緯 (d:m:s)	時刻 (UT)	露出時間 (sec)
SUPE01125460	21:42:29.983	+00:19:00.04	07:24:15.075	2.00
SUPE01125470	21:42:29.981	+00:19:00.04	07:24:50.825	2.00

具体的な測光原点の算出方法については「Suprime-Cam 2011 秋の学校版」マニュアルを参照してほしい。

4.2 報告

発見した太陽系小天体は国際天文連合 (IAU) の小惑星センター (Minor Planet Center (MPC)) へ報告することができる。この報告方法の詳細は MPC の WWW ページ (<http://www.minorplanetcenter.org/>) の

<http://www.minorplanetcenter.net/iau/info/OpticalObs.html>

などに書かれている。

なお、新規発見報告に必要な条件は2晩以上観測し、どれが同じ天体なのかが同定されていて、かつ最初の1晩の観測が2点以上あること、のようである。詳細は確認していないが、2晩以上で、それぞれ複数回の観測を行って移動を確認してあること、と考えるのが妥当であろう。

報告の際に必要な情報は、観測装置や望遠鏡情報、観測所の位置情報、天体の符号(既知のものはその名前、未知のものは仮の通し番号等)、時刻と座標、位置較正に使ったカタログ、またもし可能であれば等級である。これを以下のような形式に整える。

```
COD 568
CON 2-21-1, Osawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588, Japan
CON [***@***.***.**.*]
OBS M. Yagi, Y. Komiyama, F. Yoshida, H. Furusawa
MEA M. Yagi, F. Yoshida
TEL 8.2-m f/1.8 Subaru Telescope + CCD
NET USNO-B1.0
```

```
SPGS00 * C2009 05 25.514518 16 26 18.52 -24 31 42.47 23.9 R 568
SPGS00 C2009 05 25.517041 16 26 18.49 -24 31 42.41 23.8 R 568
...
```

最初の数行がヘッダ、後半が観測データである。このうちいくつかを説明する。

- 時刻

時刻は YYYY MM DD.dddddd の形式の UTC が必要であり、値としては露出の中心時刻が適切である。YYYY MM DD までは FITS ヘッダの DATE-OBS の情報になる。その後は FITS ヘッダの UT-STR UT-END から計算することになるのだが、Suprime-Cam では UT-END の精度が悪いことが分かっているので、UT-STR に EXPTIME の半分を加える方がよい。また、シャッターの開閉には 1.2 秒程度かかるので、露出の中心時刻は「UT-STR + 0.5*EXPTIME + 0.6 秒」として計算し、それを日単位に変換する。例えば UT-STR=12:00:00.00 EXPTIME=120.00 の場合は、露出中心時刻は 12:01:00.60 になるので、これを日単位に直して、0.500701 となる。

- 座標

RA・Dec を、RA で 0.01s、Dec で 0.1" 程度まで求める。時刻が露出中心時間なので、露出中に光度変化がないと仮定して、光度分布の重心の座標を用いることが多い。なお、座標系はどのカタログで位置較正を行ったかによって、微妙にズレが生じることがわかっているので、報告のヘッダには使ったカタログ名も書くことになる。

- 観測装置と観測所

装置と望遠鏡については Suptime-Cam の場合は、上に書いた例のままで問題ない。観測所情報は、なぜかすばるは UH88 の位置情報を (Mauna Kea) として用いて報告することが多いようである。この場合、観測所符号 (observatory code) は 568 である。

- 等級

後日の誤同定などを防ぐためにも、天体は測光しておくことが望ましく、各天体、各一点は測光情報 (等級) が必要である。フォーマット上は 0.01 等の精度まで報告できるが、0.1 等程度の精度で測光して 0.1 等までの桁で報告を行うことも良くある。

これらを形式に従って整形し、MPC にメールで報告する。今回の実習では、このうち検出した移動天体ごとに、時刻と位置、等級をまとめることまでを目指す。