IRAF を用いたスペクトル解析　[付録]
ロングスリット分光

すばる春の学校２０１１　HDS 解析講習資料

2011/5/20 改訂

図 1: ハッブル宇宙望遠鏡・Wide Field Planetary Camera 2 による HH-47 の可視光画像. 新しく生まれた星から噴出するジェットが、星間ガスと衝突して明るく輝いている。ジェットを噴出している生まれたての星は、濃い分子雲によって隠されているため、可視光では見ることができない。Credit: J. Morse/STScI and NASA (http://hubblesite.org/gallery/album/pr1995024g/)

A　はじめに

本文[1]では HDS の観測モードのうち、クロスディスパーザを使って幅広い波長域を含んだデータを取得する場合について、解析手順を説明しました。この付録では、クロスディスパーザを使わずに、ロングスリットを使って狭い波長域のみを含むデータの解析について説明します。

A.1　クロスディスパーザモードとロングスリットモード

HDS のようなエシェル分光器では、高い干渉次数を用いる際、異なる干渉次数に対するスペクトルが重なって得られます（本文 p4）。データの記録の仕方には、クロスディスパーザモードとロングスリットモードの二種類があります。本文でとりあげたクロスディスパーザモードは、エシェルとは別の分散素子（クロスディスパーザ）を使ってエシェルによる波長分散と垂直方向に光を分散するために、２次元検出器上にスペクトルが折り畳まれて記録されます（図２左）。そのため、検出器上に広い波長域にわたるデータが記録できます。一方、ロングスリットモードの場合は、クロスディスパーザの代わりに平面鏡を用い、さらに限られた波長範囲の光だけが透過するフィルターを装着します。その結果、特定の波長範囲の光だけが記録されます（図２右）。このロングスリットモードでは、狭い波長域しか記録できないかわりに、検出器上で天体の空間方向の情報を広く読み取ることができるので、銀河や星間雲などひろがった天体の観測に適しています。

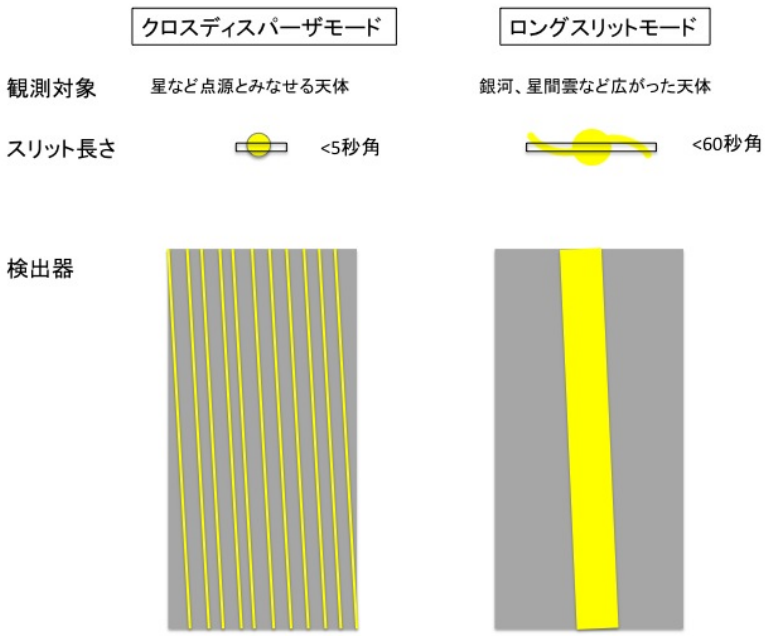


図 2: クロスディスパーザモードとロングスリットモードの概念図。

A.2　作業の流れ

クロスディスパーザモードの場合と基本的には同じで、オーバースキャン領域の処理（本文 p9）、バイアス・ダーク補正（本文 p13）、フラットフィールディング（本文 p19）を行います。スペクトルを抽出する段

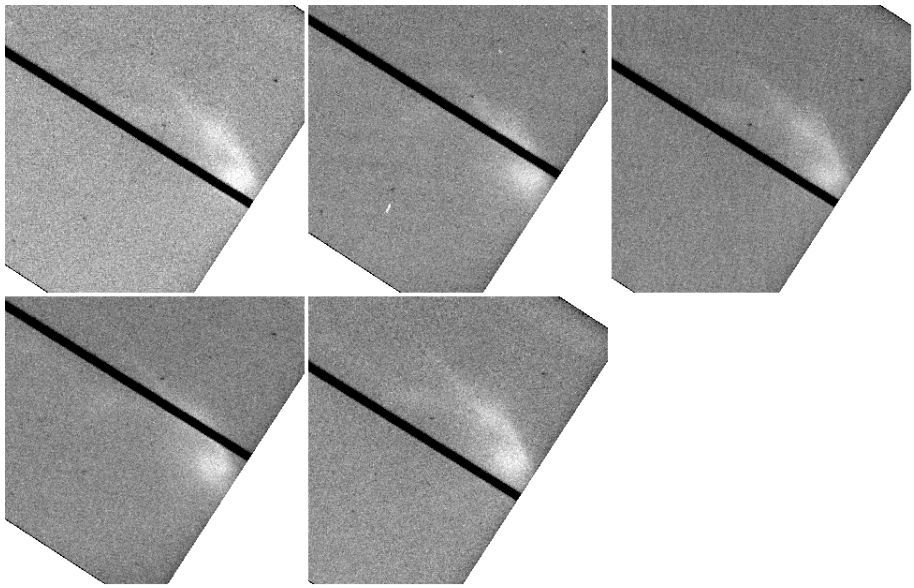


図 3: スリットビュワの画像。白くぼやけて見えるのが天体で黒い帯状に写っているのがスリット。

階からは、ロングスリットモードの場合、空間方向を積分した一次元スペクトルではなく、空間方向の情報を保ったままの 2 次元スペクトルを導出します。次に波長較正をして、横軸をピクセルから波長に直します。その際、スリット像のゆがみも補正します。

A.3 ターゲット天体

解析講習では、帆座（Vela）の方向にある HH46/47 という天体について、HDS のロングスリットモードで取得された分光データの解析を行います。HH46/47 は、Herbig-Haro object と呼ばれる天体のひとつで、若い星から噴出するジェットが周囲の星間ガスに衝突することによって明るく輝いていると考えられています。

実際に HDS で天体のどの部分にスリットを当てているか、天体と同じ時間に撮影されたスリットビュワの画像（“VGWA” で始まるファイル名）で確認しましょう。ds9 での表示例を図 3 に示します。

A.4 解析で使用するファイル

作業に移る前に、解析で使う画像ファイルを確認しておきましょう。本文 p7-8 にしたがって IRAF を立ち上げたら、データのあるディレクトリに移動し、次のようにコマンドを入力してみてください。

```
ecl> imhead *.fits
```

ファイル名のあとに、fits 画像の x, y 軸方向のピクセル数、データ型、画像の種類が表示されます。画像の種類には、FLAT, BIAS, COMPARISON と記された較正用画像ファイル、” HH46-47”などと記された天体の画像ファイルなどがあります。HDS は 2 つの CCD カメラがあり、通常は 1 回の露出でフレーム ID が奇数と偶数のふたつの fits ファイルが作られますが（本文 p9）、今回解析するロングスリットモードでは、ひとつの CCD に対応する奇数のフレーム ID のデータのみを使用します。

以下の章では、これらのファイルを使った実際の作業について詳しく説明します。

B　オーバースキャン領域処理、バイアス補正、フラットフィールディング

まずはじめに、CCD 画像の中心を縦方向に通るオーバースキャン領域（本文 p10 の図３）の処理を行います。オーバースキャン領域には、CCD に光が当たらなくても生じてしまうカウント数が記録されています。この「光が当たらなくても生じるカウント数」は、CCD の全てのピクセルで、天体からの光で生じるカウント数に加えて載っているはずです。したがって天体からのカウント数を引き出すためには、オーバースキャン領域のカウント数を全てのピクセルから差し引く必要があります。それには、本文 p9-p11 を参考に IRAF のスクリプト overscan.cl を使います。処理が終ったら、一度画像を表示してみましょう（本文 p11）。うまくいっていれば、図 4 のような画像が得られるはずです。この画像ではスリットの長さに対応する幅のスペクトルが検出器の右半分に写っています。スペクトル上の明るく写っている部分が天体からの光です。

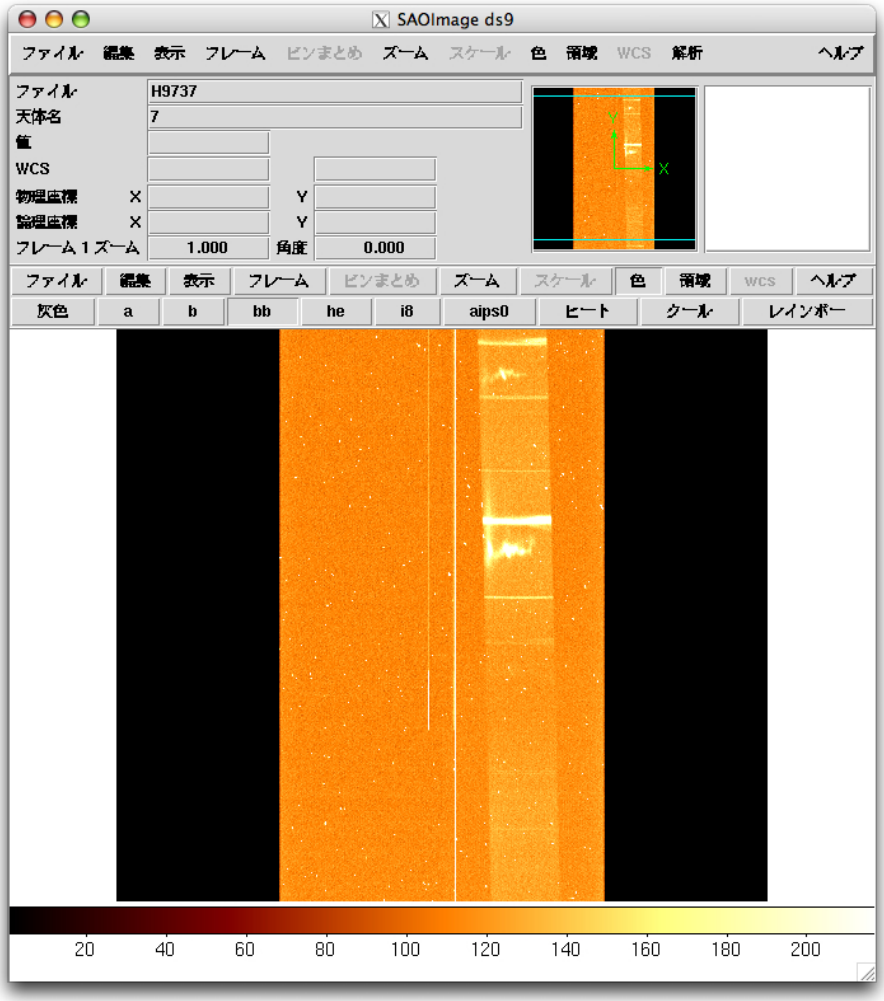


図 4: ds9 によるデータ表示例。ロングスリットモードによる天体のデータの２次元画像を表示している。

次に天体のスペクトルから CCD 自身からのシグナルを差し引く、バイアス補正を行います。バイアス補正の方法は本文 p13-14 を参照してください。
さらに、CCD はピクセルごとに感度にばらつきがあります。そのため、フラットフィールディングを行って、感度のムラを補正します。感度ムラの補正には、天体ではなく連続光を出すランプの光をスリットにあてて

とったフラットデータを用います（本文 p19）。この感度ムラだけを反映するフラットデータで天体のデータを割れば、補正されたデータを得ることができます。しかし、このフラットデータのカウントが大きすぎたり小さすぎたりすると、天体を割った結果得られるデータの数値が大きくばらついてその後の解析が難しくなります。そこでフラットデータは 1 に近い値をとるように規格化しておきます。ロングスリットモードの場合、次のようにして行います。

まずは、本文 p19 にしたがって複数のフラットデータを combine で合わせて作ったフラットフレームの断面図を見てみましょう。断面図の表示にはタスク implot を使います。

```
ecl> implot flat
```

光があたっていてカウント数の高い部分の平均値をタスク imstat を使って計算し、この数でデータを割ります。例えば次のようにします。

```
ecl> imstat flat[1300:1600,*]
#                IMAGE      NPIX      MEAN    STDDEV       MIN       MAX
    flat[1300:1600,*]   1234100    28167.    11293.     72.08    78559.
ecl> imarith flat / 28167 flatn
```

ここでは flat.fits というファイルのうち、光があたっている領域、1300-1600 列を imstat の入力に指定しています。すると、その領域のピクセル数（NPIX）、平均値（MEAN）、標準偏差（STDDEV）、最大・最小値（MIN・MAX）が出力されています。

結果得られたフレームの断面図を見て、光のあたっている部分が規格化されているかチェックしましょう。

```
ecl> implot flatn
```

この段階では、光があたっていない部分は 0 に近いカウント数になっています。このままで天体を割ると、カウントが 0 に近い値で割るために、結果の数値が大きくなり、解析がしづらくなってしまいます。そこでタスク imreplace を使って、0 に近い値を 1 に置き換えます。

```
ecl> imreplace flatn 1 upper=0.1
```

上のコマンドでは入力ファイル flatn.fits にたいして、0.1 より小さいカウント数を 1 に置き換えるように指定しています。

結果を ds9 で表示し、図 5 のように規格化されているかチェックしましょう。規格化されたフラットフレームができたら、このフレームで天体のフレームを割ります。フレームどうしの割り算には、タスク imarith を使います。

その際、あらかじめ入力ファイル名と出力ファイル名をリストにしておいて、それぞれ好きなファイル名で保存し、次のようにファイル名の先頭に@をつけて指定すると、リストにしたファイルを一気に処理できるので簡単です（@マークは、入力、出力にファイル名ではなくファイル名のリストを指定したという印、本文 p41 参照）。

```
echelle> imarith @obj.lst / flatn @objf.lst
```

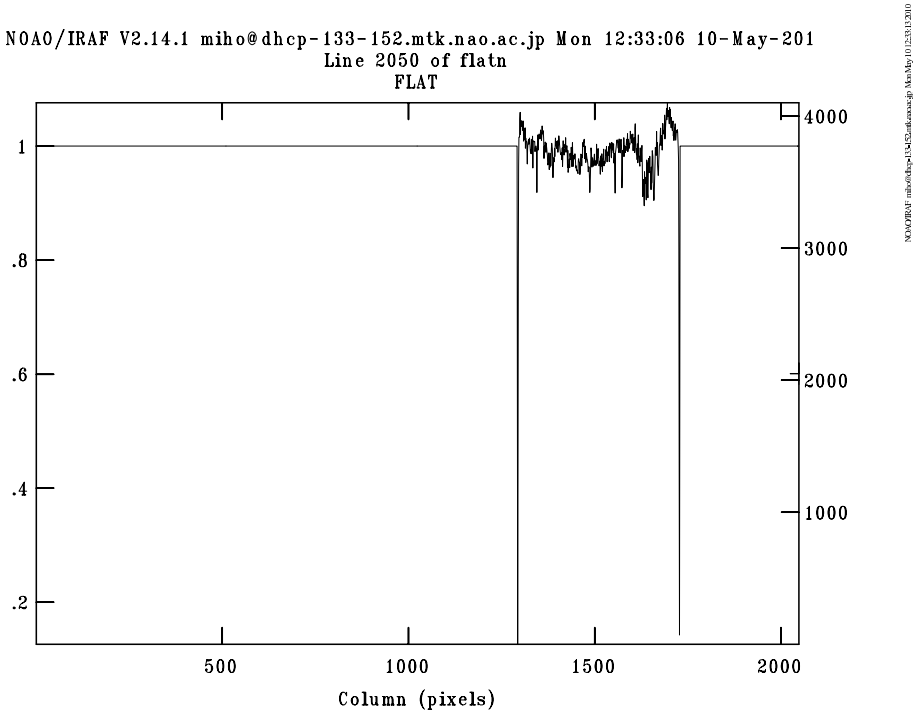


図 5: 平均値で規格化したフラットフレームの断面図（implot で表示したところ）。スリット以外の光があたらない部分はカウントが小さく、天体を割ったときに大きな値を出してしまうことを避けるために、１に置き換えてある。

C　オーダートレース

次に、ここまで処理した画像データから、スペクトルの写っている部分を抽出するために、オーダートレースという作業をします。オーダートレースとは、検出器上でスペクトルが写っている位置とその形状（正確には直線とはかぎらない）を決める作業です。スペクトルの位置と形状を決めるには、明るい星（標準星）の画像データが適しています（図 6）。標準星の画像データでオーダートレースをしたら、決めたスペクトルの位置、形状の情報を参照して、実際に解析に使う天体の画像からスペクトルの写っている部分を抽出することができます。

オーダートレースをするには、echelle パッケージに入っているタスク apall を使います。まず echelle パッケージに移動して apall のパラメータを下記のように設定します。

```
ecl> noao
      artdata.     astutil.     imred.       nproto.      onedspec.    twodspec.
      astcat.      digiphot.    mtlocal.     observatory  rv.
      astrometry.  focas.       nobsolete.   obsutil.     surfphot.

noao> imred
      argus.       crutil.      echelle.     iids.        kpnocoude.   specred.
      bias.        ctioslit.    generic.     irred.       kpnoslit.    vtel.
      ccdred.      dtoi.        hydra.       irs.         quadred.
```

```
imred> echelle
      apall          aprecenter     demos          refspectra     sflip
      apdefault@     apresize       deredden       sapertures     slist
      apedit         apscatter      dispcor        sarith         specplot
      apfind         apsum          doecslit       scombine       specshift
      apfit          aptrace        dofoe          scopy          splot
      apflatten      bplot          dopcor         sensfunc       standard
      apmask         calibrate      ecidentify     setairmass
      apnormalize    continuum      ecreidentify   setjd

echelle> epar apall
                                    I R A F
                       Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = echelle
   TASK = apall

input   =              H9791bf  List of input images
(output =             H9791bfa) List of output spectra
(apertur=                    ) Apertures
(format =              echelle) Extracted spectra format
(referen=                    ) List of aperture reference images
(profile=                    ) List of aperture profile images

(interac=                  yes) Run task interactively?
(find   =                  yes) Find apertures?
(recente=                  yes) Recenter apertures?
(resize =                  yes) Resize apertures?
(edit   =                  yes) Edit apertures?
(trace  =                  yes) Trace apertures?
(fittrac=                  yes) Fit the traced points interactively?
(extract=                  yes) Extract spectra?
(extras =                   no) Extract sky, sigma, etc.?
(review =                  yes) Review extractions?

(line   =                INDEF) Dispersion line
(nsum   =                   50) Number of dispersion lines to sum or median

                               # DEFAULT APERTURE PARAMETERS

(lower  =                  -5.) Lower aperture limit relative to center
(upper  =                   5.) Upper aperture limit relative to center
(apidtab=                    ) Aperture ID table (optional)

                               # DEFAULT BACKGROUND PARAMETERS
```

```
(b_funct=            chebyshev) Background function
(b_order=                   1) Background function order
(b_sampl=                   *) Background sample regions
(b_naver=                  -3) Background average or median
(b_niter=                   3) Background rejection iterations
(b_low_r=                  3.) Background lower rejection sigma
(b_high_=                  3.) Background upper rejection sigma
(b_grow =                  0.) Background rejection growing radius

                               # APERTURE CENTERING PARAMETERS

(width  =                  5.) Profile centering width
(radius =                 10.) Profile centering radius
(thresho=                  0.) Detection threshold for profile centering

                               # AUTOMATIC FINDING AND ORDERING PARAMETERS

nfind   =                    1  Number of apertures to be found automatically
(minsep =                  2.) Minimum separation between spectra
(maxsep =                150.) Maximum separation between spectra
(order  =          increasing) Order of apertures

                               # RECENTERING PARAMETERS

(aprecen=                    ) Apertures for recentering calculation
(npeaks =               INDEF) Select brightest peaks
(shift  =                 yes) Use average shift instead of recentering?

                               # RESIZING PARAMETERS

(llimit =               INDEF) Lower aperture limit relative to center
(ulimit =               INDEF) Upper aperture limit relative to center
(ylevel =                 0.1) Fraction of peak or intensity for automatic width
(peak   =                 yes) Is ylevel a fraction of the peak?
(bkg    =                  no) Subtract background in automatic width?
(r_grow =                  0.) Grow limits by this factor
(avglimi=                 yes) Average limits over all apertures?

                               # TRACING PARAMETERS

(t_nsum =                  10) Number of dispersion lines to sum
(t_step =                  10) Tracing step
(t_nlost=                   3) Number of consecutive times profile is lost before qui
```

```
(t_funct=             legendre) Trace fitting function
(t_order=                    3) Trace fitting function order
(t_sampl=                    *) Trace sample regions
(t_naver=                    1) Trace average or median
(t_niter=                    3) Trace rejection iterations
(t_low_r=                   3.) Trace lower rejection sigma
(t_high_=                   3.) Trace upper rejection sigma
(t_grow =                   0.) Trace rejection growing radius

                                # EXTRACTION PARAMETERS

(backgro=                 none) Background to subtract
(skybox =                    1) Box car smoothing length for sky
(weights=                 none) Extraction weights (none|variance)
(pfit   =                fit1d) Profile fitting type (fit1d|fit2d)
(clean  =                   no) Detect and replace bad pixels?
(saturat=                INDEF) Saturation level
(readnoi=                   0.) Read out noise sigma (photons)
(gain   =                   1.) Photon gain (photons/data number)
(lsigma =                   4.) Lower rejection threshold
(usigma =                   4.) Upper rejection threshold
(nsubaps=                    1) Number of subapertures per aperture
(mode   =                   ql)
```

input には標準星のデータを、output には好きな名前をいれます。このタスクは、データの断面を表示して、スペクトルがどの位置に写っているかを探します（find)。そして、スペクトルの中心位置を調べ（recente)、データを切り出す幅（アパーチャと呼びます）を決めます（resize)。自動で決めたあと、必要なら手動で修正を加えます（edit)。これらを全て行う場合には、yes にしておきます。アパーチャのサイズと位置が決まったら、スペクトルのトレースを行い、スペクトルの位置を関数でフィットしたうえで、2 次元画像からアパーチャの幅を持ったスペクトルを導出します。これらを行うために、trace、fittrac、 extract を yes にしておきます。

他に重要なパラメータは、

- nfind: スペクトルを何本検出するか。ロングスリットモードではスペクトルが一本しか写っていないので、1 にします。
- peak, ylevel:　peak を yes にすると、ylevel で指定した箇所で自動的にアパーチャのサイズを決めます。例えば peak を yes、ylevel を 0.1 にするとスペクトルのピークの高さの 10%のところがアパーチャの両端になります。

:go と入力して実行すると、図 7 左ような画面が表れます。これは自動的に標準星の位置を見つけだし、アパーチャを設定したところです。ここで、ちゃんとスペクトルを抽出したい星の位置にアパーチャがきていることを確認してください（検出器に入ってくるノイズを星と誤認識して間違った位置にアパーチャが設定

される場合があります。そのときは、画像のどの行でアパーチャを決めるかを設定するパラメータ line を設定しなおしてもう一度実行してみましょう)。

星の位置にアパーチャがきていることを確認したら、q を押してオーダートレースを行います（図 7 右)。このフィットがよくない場合には、関数の次数をあげたり、フィットをかける範囲を変更したりします。関数の次数の変更には、画面上で、:order 3 のように入力します。また、フィットをかける範囲は、両端で s を入力することで指定します。変更後あらためてフィットを行うには、f を入力します。フィットに満足したら q を入力し、終了します。

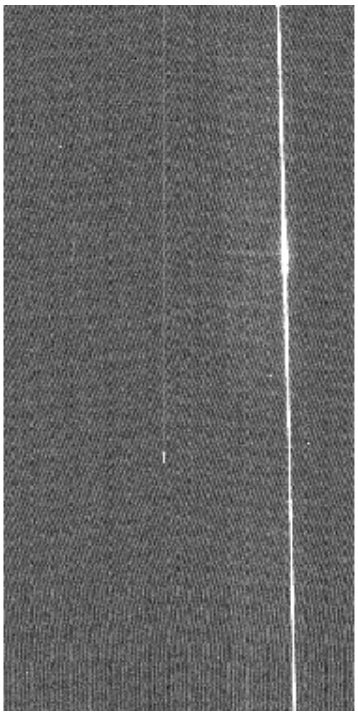
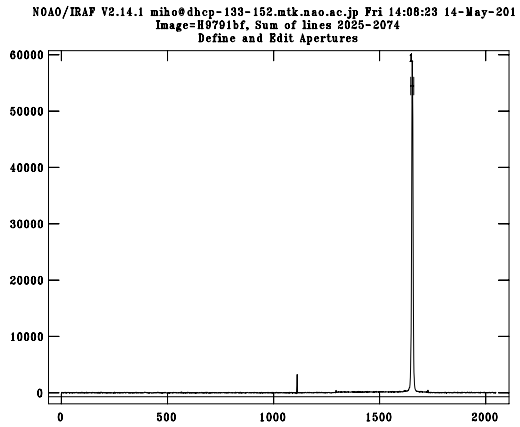


図 6: 標準星の画像

標準星の画像で作った参照データを使って、天体データと COMPARISON データからスペクトルを抽出します。タスクはさきほどと同じ apall です。ただし今回は、パラメータの format を strip とします。これにより、スリット長方向（空間方向）の各点のスペクトルを、ピクセル単位で個別に抽出することができます。さらに、reference では、さきほどオーダートレースをおこなった標準星の画像を参照データとしてファイル名を指定します。天体と標準星は、同じ分光器の設定でとっているため、スペクトルが写る位置は基本的に同じです。したがって、先ほどの標準星画像を参照することで、作業を簡略化することができます。スペクトルの位置探し（find）とトレース（trace および fittrac）で参照データを利用するので、これらを no にしておきます。アパーチャのサイズ（resize）は、天体とオーダートレースをおこなった標準星では異なり、天体自身から決めるべきですから、yes にしておきます。実行時の様子を図 8 に示します。図 8 左では自動的にアパーチャを検出したところです。天体からの光が弱いために、適切なアパーチャの位置と幅になっていません。そこで天体の写っている部分を拡大して（図 8 右)、目で見てアパーチャ中心位置と幅を設定しなおします。中心位置を動かすには、動かしたい移動先にカーソルをもってきて s を入力、幅を変えるには”:lower -200”、”:upper 200” などと中心からの幅を入力します。



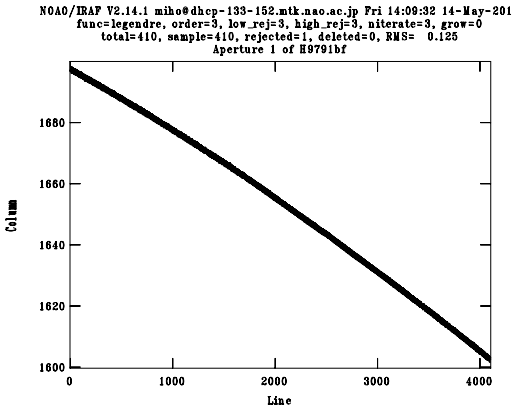
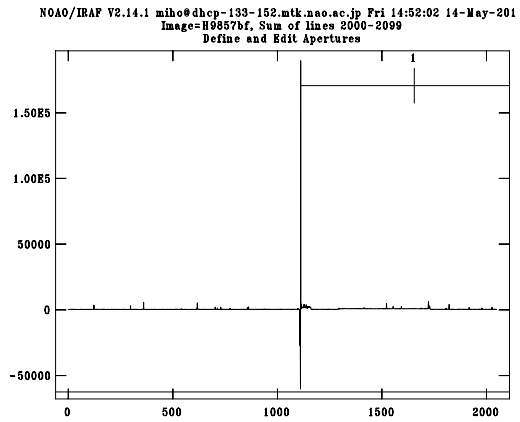


図 7: 左：apall 実行時に表示される標準星データの断面図。自動的にアパーチャを検出したところ。右：標準星のスペクトルの画像上での位置を、関数でフィットしたところ。

天体データのスペクトル抽出が終ったら、COMPARISON データのスペクトル抽出を行います。後の解析のために、アパーチャの位置と幅は全ての天体フレームと COMPARISON フレームで揃えておく必要があります。そのために、reference として先ほど抽出した天体データのファイル名を指定し、recenter, resize を no として、apall を実行します。これで天体データと COMPARISON データで大きさのそろったスペクトルが抽出できます。

さて、この apall での作業の結果、分散方向が縦から横に変化します。ds9 で抽出後の画像を確認してみましょう。



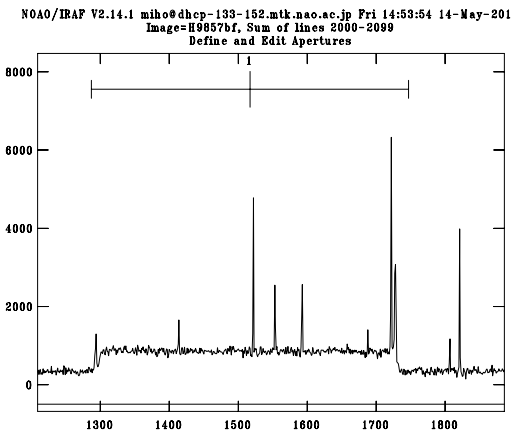


図 8: 左：天体画像で、アパーチャを検出したところ。天体からの光が弱いために、スペクトルが写っている場所が見えにくい。右：左の図を拡大したところで盛り上がっている部分が天体からの光。天体からの光が入るように、アパーチャを設定しなおす。（s コマンドでアパーチャ中心をシフトさせ、:lower, :upper コマンドでアパーチャの幅を変える。）

D　トリミング

抽出したスペクトルをみると、光があたってないない部分が端に写りこんでいる場合があり、残しておくとのちの解析が難しくなります。また、この観測モードではクロスディスパーザを用いていないために、複数

の干渉次数のスペクトルが重なって写ります。それを避けるために狭帯域フィルターを用いていますが、その透過波長域が、エシェルグレーティングの１つの干渉次数に対応する波長範囲と一致しているとは限らないので、ひとつのオーダーからはみ出た長波長側のスペクトルが、短波長側に重なっている場合があります。そのままでは波長較正ができないため、不要な部分を切り落とします。それにはまず ds9 を使って天体データを表示させ、どの部分を切り落とすか決めます。次に IRAD の imcopy というタスクで切り落としを実行します。

```
ecl> imcopy H9857bfa.0001[1800:4099,15:400] H9857bfat
```

COMPARISON データについては、天体データと同じ部分を切り落としておきます（図 D)。

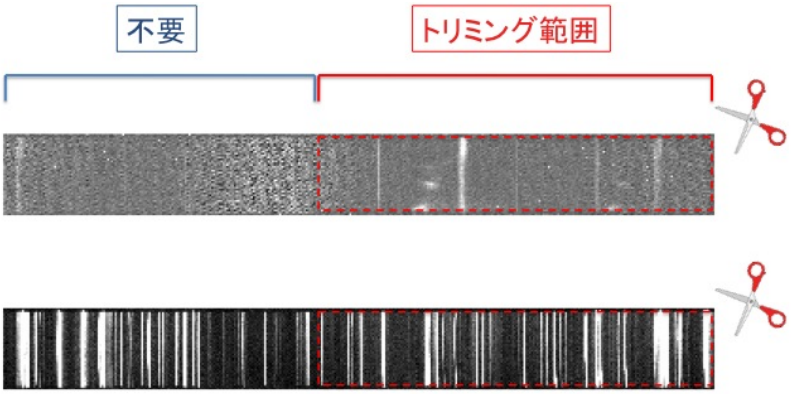


図 9: 2 次元スペクトルの抽出を終えたあとの天体フレームと COMPARISON フレーム。上下の光があたっていない部分と、スペクトルの左側 1/3 は imcopy で切り落とす

E　波長較正

以上の解析で得られた画像は横軸が CCD のピクセル数になっており、天体の情報を取り出すには、横軸を波長の単位に直す必要があります。それには、波長があらかじめ分かっている比較光源（Th-Ar ランプ）のスペクトルを使って、CCD ピクセル数から波長へ変換する関数を求め、その関数を天体の画像に適用します。また、比較光源のデータを見ると分かるように、スリット像は CCD の並びに沿っていません（図 10 上)。つまり、横軸方向のピクセル数と波長の対応関係は、縦軸方向の場所によって異なるということですので、これを補正します。最終的には横軸を波長（Å)、縦軸が空間方向になるように、2 次元座標変換を行います。そのためには、タスク identify, reidentify, fitcoords, transform を使います。

E.1　COMPARISON フレームの波長同定: identify, reidentify

まずは、IRAF の longslit パッケージにあるタスク identify を使って横軸を波長（Å）に直します。それにはまず、天体と同じ設定でとった比較光源（トリウムーアルゴンランプ）データ COMPARISON について、

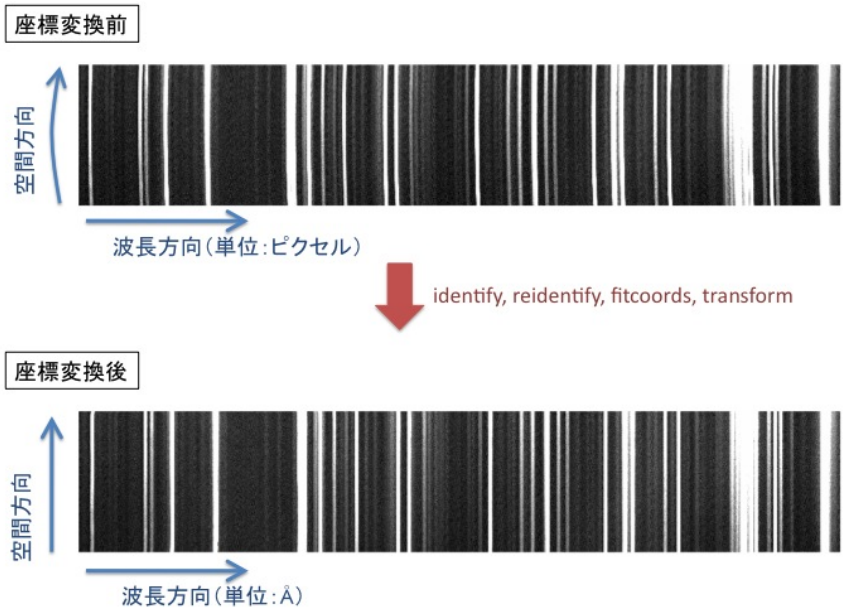


図 10: 座標変換の概念図

どの輝線がどの波長に相当するか、資料と見比べながら同定します。詳しいやりかたは本文 p26 を見てください。ロングスリットモードの場合、まず longslit パッケージに移動して、

```
echelle> bye
      argus.      crutil.     echelle.    iids.       kpnocoude.  specred.
      bias.       ctioslit.   generic.    irred.      kpnoslit.   vtel.
      ccdred.     dtoi.       hydra.      irs.        quadred.

imred> bye
      artdata.    astutil.    imred.      nproto.     onedspec.   twodspec.
      astcat.     digiphot.   mtlocal.    observatory rv.
      astrometry. focas.      nobsolete.  obsutil.    surfphot.

noao> twodspec
      apextract.  longslit.

twodspec> longslit
      aidpars@       deredden       identify       sarith         specplot
      autoidentify   dopcor         illumination   scopy          specshift
      background     extinction     lcalib         sensfunc       splot
      bplot          fceval         lscombine      setairmass     standard
      calibrate      fitcoords      reidentify     setjd          transform
```

```
      demos           fluxcalib      response       sflip
```

identify のパラメータを下記のように設定します。

```
longslit> epar identify
                                    I R A F
                        Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = longslit
   TASK = identify

images  =              H9855bat  Images containing features to be identified
(section=           middle line) Section to apply to two dimensional images
(databas=              database) Database in which to record feature data
(coordli=   linelists$thar.dat) User coordinate list
(units  =                      ) Coordinate units
(nsum   =                    20) Number of lines/columns/bands to sum in 2D images
(match  =                  20.) Coordinate list matching limit
(maxfeat=                    50) Maximum number of features for automatic identificatio
(zwidth =                 100.) Zoom graph width in user units
(ftype  =              emission) Feature type
(fwidth =                   7.) Feature width in pixels
(cradius=                  10.) Centering radius in pixels
(thresho=                  50.) Feature threshold for centering
(minsep =                   2.) Minimum pixel separation
(functio=             chebyshev) Coordinate function
(order  =                    3) Order of coordinate function
(sample =                    *) Coordinate sample regions
(niterat=                    5) Rejection iterations
(low_rej=                  3.) Lower rejection sigma
(high_re=                  3.) Upper rejection sigma
(grow   =                  0.) Rejection growing radius
(autowri=                 yes) Automatically write to database
(graphic=              stdgraph) Graphics output device
(cursor =                      ) Graphics cursor input
crval   =                        Approximate coordinate (at reference pixel)
cdelt   =                        Approximate dispersion
(aidpars=                      ) Automatic identification algorithm parameters
(mode   =                   ql)
```

images には、波長同定をしたい COMPARISON フレームの名前をいれます。上から 2 番目の section には、スリット像のどの行について波長同定をするかを指定します。ここでは中心部の行（middle line）を指

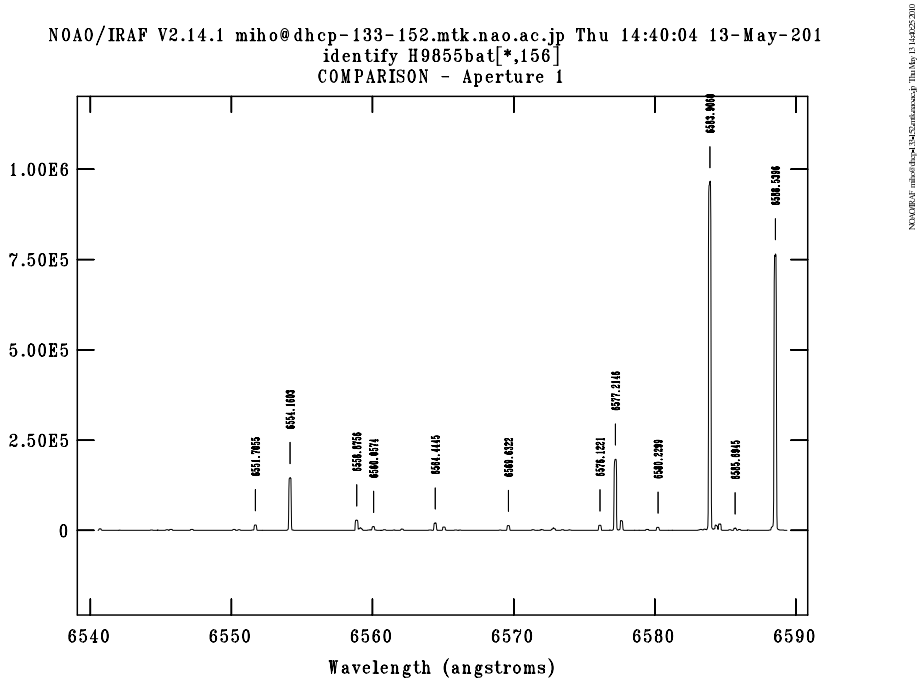


図 11: タスク identify で波長を同定したスペクトル

定します。coordli は、参照するラインリストを指定しています。波長同定のときには、すべて手動で波長を入力するのは大変なので、このラインリスト（トリウムーアルゴンランプの場合は、'linelists$thar.dat'）を参照して、途中から自動で入力できるようにします。

:go で実行すると、図 11 のように、比較光源のスペクトルが表れます。identify を使った波長同定については本文 26p を参照してください。

identify の結果、スリットの中央部の行について、CCD のピクセルと波長の対応が得られました。しかしそれ以外の場所（行）でも同じピクセル数ー波長の対応関係にあてはまるとは限りません。そこでタスク reidentify によって、他の行についても正しい波長をいれる作業を reidentify を使って行います。

```
longslit> epar reidentify

                                    I R A F
                        Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = longslit
   TASK = reidentify

referenc=              H9855bat  Reference image
images  =              H9855bat  Images to be reidentified
(interac=                    no) Interactive fitting?
(section=           middle line) Section to apply to two dimensional images
(newaps =                    no) Reidentify apertures in images not in reference?
(overrid=                   yes) Override previous solutions?
(refit  =                   yes) Refit coordinate function?
```

```
(trace  =                   yes) Trace reference image?
(step   =                     2) Step in lines/columns/bands for tracing an image
(nsum   =                     2) Number of lines/columns/bands to sum
(shift  =                    0.) Shift to add to reference features (INDEF to search)
(search =                    0.) Search radius
(nlost  =                     2) Maximum number of features which may be lost

(cradius=                   10.) Centering radius
(thresho=                    0.) Feature threshold for centering
(addfeat=                   yes) Add features from a line list?
(coordli=   linelists$thar.dat) User coordinate list
(match  =                   20.) Coordinate list matching limit
(maxfeat=                    25) Maximum number of features for automatic identificatio
(minsep =                    2.) Minimum pixel separation

(databas=              database) Database
(logfile=               logfile) List of log files
(plotfil=                     ) Plot file for residuals
(verbose=                   yes) Verbose output?
(graphic=              stdgraph) Graphics output device
(cursor =                     ) Graphics cursor input

answer  =                    no  Fit dispersion function interactively?
crval   =                        Approximate coordinate (at reference pixel)
cdelt   =                        Approximate dispersion
(aidpars=                     ) Automatic identification algorithm parameters
(mode   =                    ql)
```

referenc には、基準として参照するデータとして、identify で波長同定が済んでいる画像のファイル名をいれます。images は、reidentify で波長を同定したい画像のファイル名を指定します。ここでは identify が済んでいる COMPARISON フレーム自身について波長同定をしたいので、referenc と同じファイル名を指定します。:go で実行すると、各行での波長同定の結果が次のように表示されます。

```
REIDENTIFY: NOAO/IRAF V2.14.1 miho@dhcp-133-152.mtk.nao.ac.jp Wed 09:56:18 19-May-2010
  Reference image = H9855bat, New image = H9855bat, Refit = yes
          Image Data    Found     Fit Pix Shift  User Shift  Z Shift      RMS
H9855bat[*,211]         10/10   16/16     0.0578     0.00116  1.77E-7    0.018
H9855bat[*,209]         16/16   16/16     0.0804     0.00141  2.14E-7   0.0143
H9855bat[*,207]         15/16   15/15       0.15     0.00288  4.39E-7   0.0186
H9855bat[*,205]         15/15   16/16     -0.168    -0.00334  -5.1E-7   0.0156
H9855bat[*,203]         15/16   15/15     0.0573     0.00132  2.02E-7   0.0156
H9855bat[*,201]         14/15   16/16     -0.144    -0.00282  -4.3E-7   0.0187
```

```
H9855bat[*,199]        15/16   16/16      0.106     0.00196  2.98E-7   0.0164
                                      :
                                      :
```

ここではパラメータ step で指定した行間隔で、同定の結果を示しています。” ** Too many features lost **” というメッセージが出て同定が途中で止まる場合は、パラメータの step（波長同定を行う行間隔）や、nsum（何行分足し合わせてから同定するか）、nlost（何個ラインを見失ったらプロセスを中止するか）を変えて、もういちど実行してみてください。

ラインを同定した結果は’database/id[filename]’ というファイルに保存されます。

E.2 座標変換関数の決定：fitcoords

longslit パッケージのタスク fitcoords を使って、先ほど reidentify を適用した COMPARISON フレームについて、座標変換のためのフィッティングを行います。座標変換には、reidentify で記録した 2 次元パラメータを使います。fitcoords のパラメータの設定例は以下のとおりです。

```
longslit> epar fitcoords


                                    I R A F
                         Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = longslit
   TASK = fitcoords

images  =             H9855bat  Images whose coordinates are to be fit
(fitname=             H9855bat) Name for coordinate fit in the database
(interac=                  yes) Fit coordinates interactively?
(combine=                  yes) Combine input coordinates for a single fit?
(databas=             database) Database
(deletio=         deletions.db) Deletion list file (not used if null)
(functio=            chebyshev) Type of fitting function
(xorder =                    6) X order of fitting function
(yorder =                    6) Y order of fitting function
(logfile=       STDOUT,logfile) Log files
(plotfil=             plotfile) Plot log file
(graphic=             stdgraph) Graphics output device
(cursor =                    ) Graphics cursor input
(mode   =                   ql)
```

images はフィッティングをしたい画像のファイル名で、先ほど identify, reidentify を適用して座標変換のための情報を記録した COMPARISON フレームを指定します。実行すると、フィッティングのための x 方向のピクセル数に対して、フィットした関数からの残差が、図 12 のように表示されます。飛び抜けて残差が大きい点は、identify や reidentify での輝線の同定が間違っている可能性が高いので、点の近くにカーソルをもっ

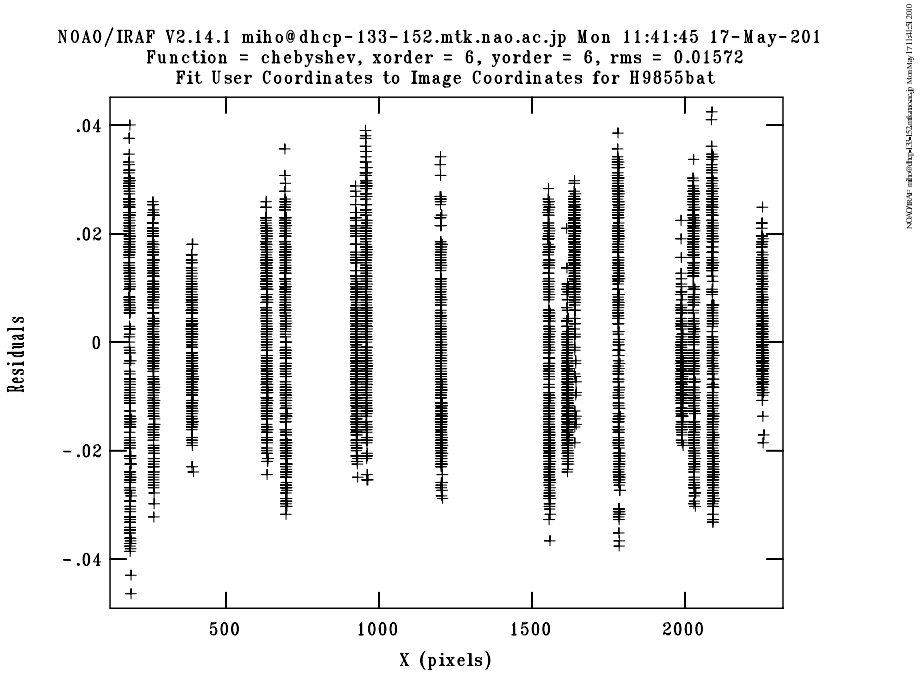


図 12: fitcoords の実行画面

ていって、d→p と入力するとフィットから外すことができます。不要な点を消して改めて f を入力してフィットします rms が 0.02 より小さくなれば、おおむねフィットがもっともらしいと言えます。フィットに満足したら、q を入力して終了します。最後に座標変換パラメータを記録するかどうか聞かれるので yes で答えます。結果の座標変換パラメータは'database/fc[filename]' に保存されます。

E.3 座標変換の実行：transform

これまでの作業で、座標変換を行うためのパラメータが出揃いました。ここではそれらのパラメータを使って、座標変換を実行します。それには transform を使います。まずは先ほどから座標変換の基準として使っている COMPARISON フレームについて実行します。パラメータの設定例は以下のとおりです。

```
longslit> epar transform


                                    I R A F
                        Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = longslit
   TASK = transform

input   =             H9855bat  Input images
output  =            H9855batw  Output images
(minput =                     ) Input masks
(moutput=                     ) Output masks
fitnames=             H9855bat  Names of coordinate fits in the database
```

```
(databas=             database) Identify database
(interpt=              spline3) Interpolation type
(x1     =                INDEF) Output starting x coordinate
(x2     =                INDEF) Output ending x coordinate
(dx     =                INDEF) Output X pixel interval
(nx     =                INDEF) Number of output x pixels
(xlog   =                   no) Logarithmic x coordinate?
(y1     =                INDEF) Output starting y coordinate
(y2     =                INDEF) Output ending y coordinate
(dy     =                INDEF) Output Y pixel interval
(ny     =                INDEF) Number of output y pixels
(ylog   =                   no) Logarithmic y coordinate?
(flux   =                  yes) Conserve flux per pixel?
(blank  =                INDEF) Value for out of range pixels
(logfile=       STDOUT,logfile) List of log files
(mode   =                   ql)
```

終わったら ds9 で出力した画像（'H9855batw.fits'）を確認してみましょう。図 10 の下のように、輝線がまっすぐになっているでしょうか。

変換が正常にできたことを確認したら、天体の画像にも transform を実行します。その際、input は天体の画像ファイル名、output は好きな名前、fitnames は fitcoords を適用した COMPARISON フレームのファイル名を指定します。

F　スペクトルの表示

解析が終わった画像をプロットして、天体のスペクトルを見てみましょう。そのためにはタスク splot が便利です。

```
longslit> splot H9863bfatw
```

上のようにファイル名を指定して実行すると、スリット上のどの位置をプロットするか聞かれます。まずはデフォルト 1（スリット長の端）のままリターンをしてみましょう。図 13 のようにスペクトルが表示されます。他の位置に移動してプロットするには、'(' または')' を入力します。拡大するには、w を入力したあと、拡大したい領域の左下にカーソルをおいて e、続けて右上にカーソルをおいて e と入力します。

練習問題

- 解析済のスペクトルを眺めてみましょう。何本のスペクトル線が受かっているでしょうか。
- 各スペクトル線の強さ、幅、中心波長を測ってみてください。（ヒント：splot, 'k' コマンドを使います。詳しくは本文 p37）
- それぞれ何のスペクトル線でしょうか。（ヒント：参考文献 2）
- ひとつのスペクトル線に注目して、スペクトル線の中心波長や幅が場所ごとに変化するかどうか見てみましょう。

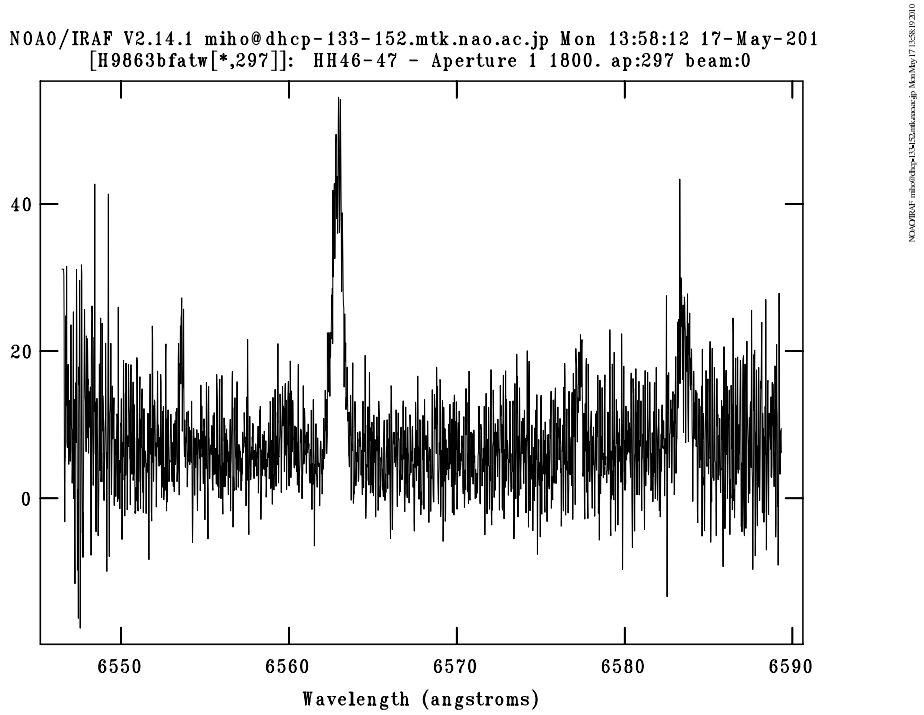


図 13: splot によるスペクトルの表示

以上で基本的な解析作業は終了です。ここからはデータを解釈し、ターゲットの天体についてさまざまな物理量を決定する段階に入ります。例えばロングスリットモードのデータを使うと、天体の空間構造や、天体に付随するガスの運動状態などを予測することができます [2]。今後の解析については本文 p37-40 を参照してください。

応用問題

- 解析が終った 2 次元画像を ds9 で表示し、コントア（等高線）を書いてみましょう。同定したスペクトルがどこに写っているか確認してみてください。
- HH 46/47 には高速で運動するジェットに対応して、スペクトル線がドップラーシフトしています。同定したスペクトル線のドップラーシフト量から、視線速度を求めてみましょう。（本文 p37 参照）
- ターゲット天体はなぜ測定したような視線速度で運動しているのでしょうか。文献等で調べてみましょう。

参考文献

1. 青木和光、すばる/HDS データ解析講習会資料「IRAF を用いたスペクトル解析」
2. Nishikawa et al. 2008, ApJ, 684, 1260