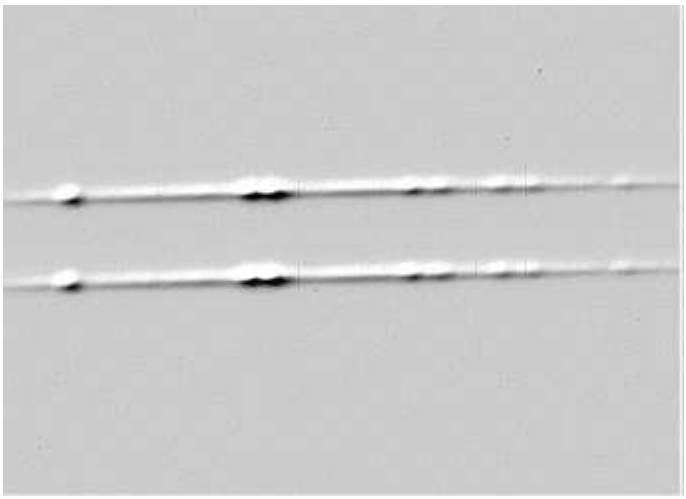
ＨＢＳデータ整約マニュアル ver. 2.10

1999 年 7 月 25 日

川端 弘治　国立天文台
平方 伸之　東北大学理学部天文学教室
秋田谷 洋　東北大学理学部天文学教室
池田 優二　東北大学理学部天文学教室



目 次

1 はじめに **3**

1.1 配布について 3

1.2 バージョンについて 4

2 HBS 解析ソフトのインストール **5**

2.1 HBS 解析ソフトの動作環境 5

2.2 HBS 解析ソフトの構成 5

2.3 HBS 解析ソフトのダウンロード 6

2.4 プログラム群のインストール 6

2.5 キャリブレーションデータ群のインストール 7

2.6 ソフトの初期設定:**hbsinit.cl** の修正 7

2.7 UNIX shell の設定 8

2.8 login.cl の設定 8

A IRAF のインストール 9

A.1 IRAF のインストールについて 9

A.2 参考資料 9

B CFITSIO ライブラリのインストール 10

B.1 CFITSIO ライブラリとは 10

B.2 ファイルのダウンロード 10

B.3 CFITSIO ライブラリのコンパイルとインストール 10

B.4 参考資料 12

3 ＨＢＳの誤差評価と限界 **13**

3.1 ＨＢＳの装置の概要 13

3.2 光学器械系に起因する誤差 13

3.2.1 $\lambda/2$ 波長板とウォラストン ・プリズム 13

3.2.2 $\lambda/4$ 波長板以降 18

3.3 受光装置の誤差 21

3.3.1 ランダムな要因 21

3.3.2 系統的な誤差要因 25

4 整約の流れと較正法 **29**
4.1 整約の流れ 29
4.1.1 1 次整約部 29
4.1.2 較正部 30
4.2 プロセス一覧 31
4.3 各プロセスの説明 31

5 整約ソフトウェアの実行 **51**
5.1 初期設定の確認 51
5.1.1 login.cl 51
5.1.2 キャリブレーションデータの確認 52
5.1.3 観測データの確認 52
5.1.4 hbsinit.cl の設定 55
5.2 ソフトの実行 58
5.2.1 IRAF の起動 58
5.2.2 hbsinit 59
5.2.3 hbsred 59
5.2.4 IRAF の終了 66

6 こんな時は **67**
6.1 問い合わせ先など 67
6.2 ソフトについて 67
6.3 さらに上手に使うために 68

参考文献 **69**

第 1 章 1

はじめに

このソフトウェアは、低分散・偏光分光測光装置 (ＨＢＳ) を用いて得られた観測データの整約を、合理的に、かつ効率良く行うことを目的として開発されています。可能である限り自動化をはかり、整約ミスの少ない使いやすいソフトを作り上げることを目標としてきました。今後も改良を進め、随時最新版を配布していく予定です。

当ソフトウェア (通称 HBSRED) は、IRAF (Image Reduction and Analysis Facility, NOAO 配布) 上で動作するよう、作られています。大半は、IRAF のプログラム言語とも言うべき、CL script で書かれていますが、一部、C 言語で書かれたプログラムも使用しています。その C 言語のプログラムは、FITS 形式の画像ファイルの読み書きに便利な CFITSIO ライブラリを使用しています。さらに、適宜 unix の標準的なコマンドも使用しています。よって、動作環境としては、IRAF が動く unix マシンで、IRAF および CFITSIO がインストールされているもの、ということになります。

なお、このマニュアルは、unix や IRAF の初 ~ 中級者を想定して作られています。初心者のユーザーで、まわりに慣れた人がみつからない場合は、いろいろとわからないままのことも多いと思います。その場合、我々のグループで可能な限り援助致しますので、連絡下さい。また、当ソフトウェアは我々の観測に最適化されたものになっていますので、慣れてくると気に食わない点がでてくるかもしれませんが、自由に改良して使っていただいて結構です。ただ、我々はそのような情報を今後の参考にしたいと考えていますので、できるだけ知らせていただけると助かります。バグ情報やコメント、お叱り等も歓迎しますので、連絡ください。連絡はメールで、hbs@astr.tohoku.ac.jp (1999 年 7 月現在) までお願いします。なお、バージョンアップ情報その他の情報は、HBS のユーザーに逐次流す予定ですが、国立天文台のウェブページでの紹介も検討しています。

1.1　配布について

本マニュアルの最新版は、PostScript 形式のファイル (redman.ps) あるいはその圧縮版 (redman.ps.Z) として、
http://optik2.mtk.nao.ac.jp/HBS/download/manual/ からウェブを介して持っていく

ことができます。なお、印刷されたマニュアルについては、国立天文台堂平観測所に常備されていますので、こちらの方も御利用下さい。

整約ソフトウェアは、身近にワークステーションがあれば、このマニュアルに従ってダウンロード / インストールしていただいて使用してもらうのが便利だと思いますが、堂平観測所にも、整約ソフトウェアがインストールされたワークステーションが 2 台 (mueller, stokes) 用意されていますので、是非御利用下さい。これら 2 台には、整約用に環境の整っているアカウントが用意されています。詳しくは、堂平観測所に置いてある整約マニュアルを参照して下さい。

1.2 バージョンについて

このマニュアルのバージョンは、2.10 です。これは、整約ソフトウェアのバージョン 2.* に対応しています。ある程度の校正は済んでいますが、まだ若干の誤りが存在するかもしれませんので、式や値を参照する際には十分注意していただくよう、お願いするとともに、そのような箇所に気づかれた場合には、上記アドレスまで御一報いただくよう、お願い申し上げます。また、 4 章については、すでにいくつか意見をいただいていますので、なるべく参照しやすい工夫をこらしていきたいと思います。

第 2 章 2

HBS 解析ソフトのインストール

2.1 HBS 解析ソフトの動作環境

HBS 解析ソフトのプログラム群は、主に IRAF の cl スクリプトと C 言語プログラムで構成されています。HBS 解析ソフトの clscript は、IRAF バージョン 2.10.x もしくは 2.11.x で動作します [†] 。

また、C 言語プログラムのいくつかは、CFITSIO ライブラリを使用します。

よって、

- IRAF 2.10.x or 2.11.x
- CFITSIO ライブラリ

が導入されている UNIX ワークステーションが必須です。

ここでは、上記のソフト環境が既に整っているものとして、UNIX ワークステーションへの HBS 解析ソフトの導入について解説します。IRAF のインストール、CFITSIO ライブラリのインストールについては、それぞれ A、Bを参照して下さい。

2.2 HBS 解析ソフトの構成

HBS による観測データを解析するには、解析を行うプログラム群 (IRAF clscript,C 言語プログラムなど) と、観測時期に応じたキャリブレーションデータ群 (スカイフラットデータ、標準星データなど) が必要です。
それぞれ、以下のようなディレクトリ構造になっています。

- プログラム群 (配布形式 ; **hbssoft.tar.Z**)
  - **prog/** : C 言語プログラム、UNIX シェルスクリプト

[†]HBS 解析ソフトは IRAF バージョン 2.10.4 上で開発されました。1998 年 7 月における最新バージョン 2.11.1 への対応もされており、一応動作することを確認しましたが、まだ不備がある可能性もあります。

  - **clscript/** : IRAF cl スクリプト
  - **etc/** : 各種参照データ

- キャリブレーションデータ群 (配布形式 ; **hbscalxxxx.tar.Z**)
  - **xxxxcal/** : xxxx 期のキャリブレーションデータ
    xxxx は対応する時期を表します。例:**9712cal/**(1997 年 12 月期)

2.3 HBS 解析ソフトのダウンロード

HBS 解析ソフトの各ファイルは、プログラム群とキャリブレーションデータ群に分け、tar された形で、http サイト

- `http://optik2.mtk.nao.ac.jp/HBS/download/software/`

および、

- `http://optik2.mtk.nao.ac.jp/HBS/download/calib_data/`

にそれぞれ置いてあります。
プログラム群のアーカイブファイル **hbssoft.tar.Z** と、解析するデータの観測期に応じたキャリブレーションデータ群のアーカイブファイル **hbscalxxxx.tar** を、NETSCAPE などのウェブ上でダウンロードします。
どのキャリブレーションデータ群のアーカイブファイルがどの観測期に対応するかは、アーカイブファイルと同じディレクトリにある **README** ファイルを参照して下さい。基本的に、"**hbscal+(年月).tar.Z**"(例 1997 年 12 月期 ~ なら、**hbscal9712.tar.Z**) となっています。
解析するデータが複数の観測期にまたがっている場合は、それぞれの観測期に応じた全てのキャリブレーションデータ群のアーカイブファイルをダウンロードします。

2.4 プログラム群のインストール

HBS 解析ソフトのプログラム群をインストールするディレクトリを適当に選びます。ユーザーが書き込みできるディレクトリなら、どこでも構いません。ここでは、~/iraf/上にインストールするとして解説します。
インストール先のディレクトリに移動し、**hbssoft.tar.Z** を解凍、展開すると、自動的に **prog/**、**clscript/**、**etc/**の各ディレクトリが作成されます。

```
% cd ~/iraf/
% cat /path/hbssoft.tar.Z | uncompress | tar -xpf -
```

(*path* は **hbssoft.tar.Z** をダウンロードしたディレクトリ)
% **ls -F**
etc/ prog/ clscript/

2.5 キャリブレーションデータ群のインストール

キャリブレーションデータ群をインストールするディレクトリを適当に選びます。ユーザーが書き込みできるディレクトリなら、どこでも構いません。ここでは、/work/にインストールするとします。
インストール先のディレクトリに移動し、**hbscalxxxx.tar.Z** を解凍、展開すると、自動的にキャリブレーションデータの入っているディレクトリ、**xxxxcal/**が作成されます。

% **cd /work/**
% **cat /***path*/**hbscalxxxx.tar.Z | uncompress | tar -xpf -**
(*path* は **hbscalxxxx.tar.Z** をダウンロードしたディレクトリ)
% **ls -F**
xxxxcal/

2.6 ソフトの初期設定:hbsinit.cl の修正

clscript/中の **hbsinit.cl** には、プログラム群、キャリブレーションデータ群のパスが記述されており、解析ソフト実行の際に参照されます。ここでは、prog/、clscript/、etc/、および xxxxcal/のローカルなシステム内での配置場所を、**hbsinit.cl** に記述します。
次のように、**hbsinit.cl** 内の太字で書かれた該当箇所 (5 箇所) のパスを、インストールした位置 (ここでは、解析ソフトが/(*user home directory*)**/iraf/**、キャリブレーションデータが**/work/**) に応じて書き換えて下さい。
複数の観測期のキャリブレーションデータ群をインストールした場合は、解析開始時に、それぞれの観測期に応じたキャリブレーションデータのディレクトリを改めて **hbsinit.cl** 上で指定し直すことになります。ここでは、とりあえず、インストールしたうちのどれかひとつの観測期のキャリブレーションデータのディレクトリを記述しておいてください。

% **cd ~/iraf/clscript/**
% **vi hbsinit.cl**
⌇
#— Directory Setting
Directory of C-program Definition Header File
set _defhdir = "**/work/xxxxcal/**"
Directory of 2hole-Diaph. calib files

set _caldir = "**/work/xxxxcal/**"
Directory of CL-scripts
set _clscript = "**/(***user home directory***)/iraf/clscript/**"
Directory of C-programs
set _progdir = "**/(***user home directory***)/iraf/prog/**"
Directory of miscelenaous
set _etcdir = "**/(***user home directory***)/iraf/etc/**"

※ (*user home directory*) は各自のホームディレクトリのパスに読み換えて下さい。

なお、これらのパスの記述を変更すれば、prog/、clscript/、etc/および xxxxcal/の各ディレクトリを、それぞれユーザーの好みの場所に配置することもできます。
(同じワークステーションで複数のユーザーが HBS 解析ソフトを使用するときは、容量の大きいキャリブレーションデータ群を共有するのも良い方法です)

2.7 UNIX shell の設定

prog/を UNIX shell の path に通します。これは、HBS 解析ソフトの IRAF cl スクリプトから、**prog/**内の C 言語プログラムを呼び出すために必要です。
例えば、UNIX shell として csh や tcsh を使用している場合、**~/.cshrc** ファイルに、

path = ($path ~/iraf/prog)
(**prog/**を**~/iraf/**にインストールした場合)

を追加し、shell の再起動か**.cshrc** ファイルの再読み込みを行います。

% **cat >> ~/.cshrc**
path = ($path ~/iraf/prog)
CTRL + **D**
% **source ~/.cshrc**

2.8 login.cl の設定

hbsinit.cl を IRAF のタスク **hbsinit** として登録します。これは、データ解析の最初の cl スクリプト **hbsinit.cl** を実行するために必要です。
各自の IRAF のホームディレクトリ (例えば、**~/iraf/**) にある **login.cl** を修正します。
login.cl 中の、package user 以下の task 登録の記述中に、

task $hbsinit = hbsinit.cl

を追加します。

```
% cd ~/iraf/
% vi login.cl
        ⌇
# Default USER package; extend or modify as you wish. Note that this can
# be used to call FORTRAN programs from IRAF.

package user

task $hbsinit = hbsinit.cl

task $adb $bc $cal $cat $comm $cp $csh $date $dbx $df $diff = "$foreign"
task $du $find $finger $ftp $grep $lpq $lprm $ls $mail $make = "$foreign"
        ⌇
```

A IRAF のインストール

A.1 IRAF のインストールについて

IRAF(Image Reduction and Analysis Facility) は、NOAO が配布している天文データ解析ソフトです。HBS 解析ソフトは、IRAF 上で動作するスクリプトプログラムを中心に構成されています。

HBS 解析ソフトは IRAF バージョン 2.10.x および 2.11.x で動作します。HBS 解析ソフトを使用するためには、バージョン 2.10.x 系統の IRAF もしくはバージョン 2.11.x 系統の IRAF をインストールしてください。

なお、このソフトはバージョン 2.10.x 用上で開発したものを、ごく最近バージョン 2.11.x にも対応させたものです。バージョン 2.11.x での簡単な動作確認は行っていますが、まだ十分とはいえないので、出来るだけバージョン 2.10.x での使用をお勧めします。

IRAF のインストールの手順は使用しているアーキテクチャーによって変わることがあります。参考資料に挙げた IRAF の web サイトのインストールガイドに従ってインストールを行ってください。

A.2 参考資料

- IRAF web page(国内ミラーサイト)
  http://sinobu.mtk.nao.ac.jp/iraf/web/
  - インストールガイド
    http://sinobu.mtk.nao.ac.jp/iraf/web/docs/igsm.html

  - FTP ダウンロードサイト
    ftp://sinobu.mtk.nao.ac.jp/NOAO/iraf/

- IRAF クックブック 第 2 版
  (監修 :天文情報処理研究会、発行 :国立天文台天文学データ解析計算センター)

  - 天文情報処理研究会の電子出版物
    http://bandai.mtk.nao.ac.jp/jaipa/e-pub.html

B CFITSIO ライブラリのインストール

B.1 CFITSIO ライブラリとは

CFITSIO ライブラリは、C 言語プログラムから FITS 形式のファイルを読み書きするためのルーチンを集めたライブラリです。NASA Goddard Space Flight Center の HEASARC (High Energy Astrophysics Science ArchiveResearch Center) で開発されています。HBS 解析ソフトでは、いくつかの C 言語プログラムがこの CFITSIO ライブラリを使用して FITS 形式のファイルを取り扱っています。

1998 年 5 月現在の最新バージョンは 1.42 です。HBS 解析ソフトでは、1.42 より新しいバージョンの CFITSIO ライブラリを使用して下さい。

B.2 ファイルのダウンロード

web サイト **http://legacy.gsfc.nasa.gov/docs/software/fitsio/fitsio_release.html**
もしくは、
anonymous ftp サイト **ftp://heasarc.gsfc.nasa.gov/software/fitsio/c/**
から、**cfitsio142.tar.Z**(1.6MB) をダウンロードします。

B.3 CFITSIO ライブラリのコンパイルとインストール

1. 適当な作業ディレクトリで、**cfitsio142.tar.Z** を解凍 ·展開します。ここでは~/tmp/ を作業ディレクトリとして解説します。

   % **cd ~/tmp/**
   % **cat** */path*/**cfitsio142.tar.Z** | **uncompress** | **tar -xpf -**
   (*path* は、**cfitsio142.tar.Z** をダウンロードしたディレクトリ)

2. ./configure スクリプトで Makefile を環境に応じて整えて、CFITSIS ライブラリ **libcfitsio.a** を make します。詳細は、解凍したファイル群に含まれているオンラインド

キュメント群 (**README**、**cfitsio.doc** など) を参照して下さい。

```
% ./configure
creating cache ./config.cache
checking for uname... 1
checking for gcc... gcc
checking whether the C compiler (gcc ) works... yes
                          ⌇
checking for limits.h... yes
cfitsio: == Using gcc version 2.7.2.2
updating cache ./config.cache
creating ./config.status
creating Makefile
% make
echo "cfitsio: compiling c files..."; \
    gcc -c -g -O2 -Dsolaris buffers.c cfileio.c checksum.c fitscore.c getcol*.c
editcol.c edithdu.c getkey.c modkey.c putcol*.c putkey.c scalnull.c swap-
proc.c wcsutil.c compress.c f77_wrap1.c f77_wrap2.c; \
       ⌇
ar: creating libcfitsio.a
ar: writing libcfitsio.a
rm -f *.o
```

3. コンパイルされた CFITSIO ライブラリ **libcfitsio.a** を C コンパイラが参照する lib ディレクトリ (**/usr/local/lib/**) にコピーします。また、CFITSIO ライブラリのヘッダーファイル群もコンパイラが参照する include ディレクトリ (**/usr/local/include/**) にコピーします。
   ここでは、スーパーユーザーになることが必要です。

```
% cd ~/tmp
% su
Password: xxxxxx
# cp libcfitsio.a /usr/local/lib/
# ls /usr/local/lib/*.a
libcfitsio.a
# cp *.h /usr/local/include/
# ls /usr/local/include/*.h
 cfortran.h    f77_wrap.h   fitsio2.h      pctype.h
 compress.h    fitsio.h     longnam.h
```

```
# exit
```

B.4 参考資料

- FITSIO Home Page
  http://legacy.gsfc.nasa.gov/fitsio/
  - CFITSIO User's Guide
    http://legacy.gsfc.nasa.gov/docs/software/fitsio/c/c_user/c_user.html
  - **ダウンロード**
    http://legacy.gsfc.nasa.gov/docs/software/fitsio/fitsio_release.html
    ftp://heasarc.gsfc.nasa.gov/software/fitsio/c/cfitsio142.tar.Z

第 3 章 3

ＨＢＳの誤差評価と限界

3.1　ＨＢＳの装置の概要

ＨＢＳは、図 3.1のように、上から順に較正系、偏光解析系、分光器、受光部から成っています。このうち、通常の観測において、光の変換を行なう光学素子は、偏光解析系、および分光器です。

望遠鏡の焦点面に置かれたダイヤフラムを通過し、偏光解析系に入った光は、まずレンズで平行光に変換され、回転する$\lambda/2$ 波長板を通過したあと、ウォラストンプリズムで常光と異常光にわけられます。その後、ウォラストンプリズムの主軸に対して 45 度回転した方向に光学軸をあわせた$\lambda/4$ 波長板を通過し、常光、異常光ともに円偏光に近い楕円偏光に変換されます。再びレンズで収束光となり、焦点を結んだあと、分光器に入ります。分光器の中では、４５度鏡、コリメーター（反射鏡）、グレーティング、カメラレンズの順に通過・反射して、受光部に、常光・異常光それぞれのスペクトル像を結びます。

このようにして、２つ穴ダイヤフラムの場合には、最終的に４本のスペクトル像を得ることになります（図 3.2）。

3.2　光学器械系に起因する誤差

ＨＢＳにおける光学素子の不完全性や、機械的な配置ミスによる誤差を評価し、最適な較正法の基礎を得てみましょう。

3.2.1　$\lambda/2$ 波長板とウォラストン・プリズム

ウォラストン・プリズムによって常光と異常光に分けられるまでの光学系について考えてみます。この部分は、偏光を測定するための核になる部分です。

まず各光学素子の性質をあらわすミューラー行列を求めます。その後、各成分の微小のずれが誤差としてどのように効いてくるのかを評価します。

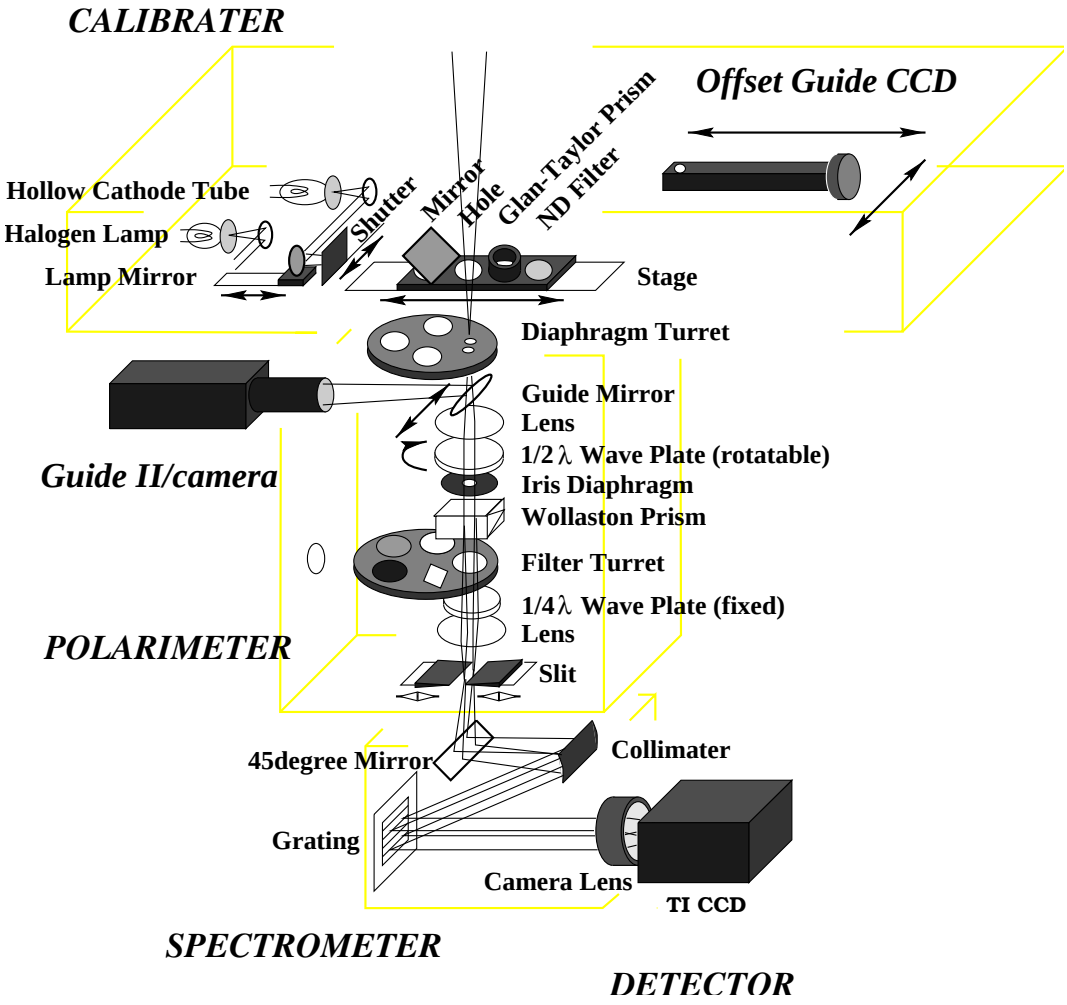

CALIBRATER
Offset Guide CCD
Glan-Taylor Prism
ND Filter
Mirror
Hole
Shutter
Hollow Cathode Tube
Halogen Lamp
Lamp Mirror
Stage
Diaphragm Turret
Guide Mirror
Lens
1/2λ Wave Plate (rotatable)
Iris Diaphragm
Wollaston Prism
Guide II/camera
Filter Turret
1/4λ Wave Plate (fixed)
Lens
POLARIMETER
Slit
45degree Mirror
Collimater
Grating
Camera Lens
TI CCD
SPECTROMETER
DETECTOR

図 3.1: ＨＢＳの模式図

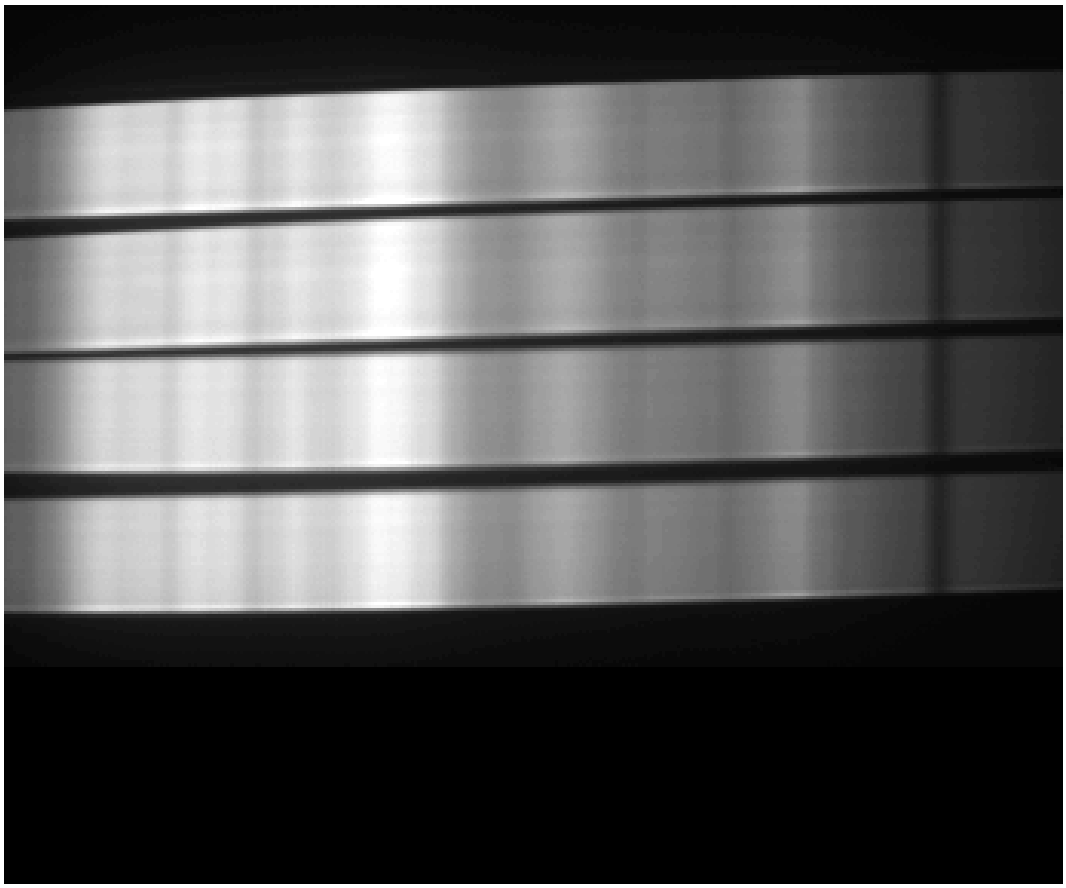


図 3.2: ＨＢＳで撮影された画像例 :昼スカイ

ここでは、それぞれの素子に対する入射光のストークス ・ベクトルを$\boldsymbol{I} = (I, Q, U, V)$、出射光のストークス ・ベクトルを$\boldsymbol{I}' = (I', Q', U', V')$ としています。

$\lambda/2$ 波長板

$\lambda/2$ 波長板の光学軸の方位角ψ_1'は、光学等価軸の基準方位角をψ_1、$\delta\psi_1$をその波長依存性成分、さらに$\Delta\psi_1$を器械的な回転角決定精度とすると、$\psi_1' = \psi_1 + \delta\psi_1 + \Delta\psi_1$ と書くことができます。さらにリターダンスτ_1'を、$\Delta\tau_1$を誤差分として$\tau_1' = 180^\circ + \Delta\tau_1$と置くと、

$$\begin{aligned}\boldsymbol{I}' &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{I} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_1 + H_1\cos 4\psi_1' & H_1 \sin 4\psi_1' & -\sin\tau_1' \sin 2\psi_1' \\ 0 & H_1 \sin 4\psi_1' & G_1 - H_1\cos 4\psi_1' & \sin\tau_1' \cos 2\psi_1' \\ 0 & -\sin\tau_1' \sin 2\psi_1' & \sin\tau_1' \cos 2\psi_1' & \cos\tau_1' \end{bmatrix} \boldsymbol{I}\end{aligned} \tag{3.1}$$

となります。ここで、

$$G_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos\tau_1'), \quad H_1 = \frac{1}{2}(1 - \cos\tau_1') \tag{3.2}$$

とおきました。

波長λの入射光が、$\lambda/2$ 波長板の法線と、微小角 i_1をなして入射する場合、

$$\tau_1 \simeq 2\pi(n_{1e} - n_{1o})\frac{s_1}{\lambda}\left[1 - \frac{i_1^2}{2n_{1o}}\left(\frac{\cos^2\omega_1}{n_{1o}} - \frac{\sin^2\omega_1}{n_{1e}}\right)\right] \tag{3.3}$$

となります。ここで、ω_1は入射光の波面と波長板の結晶の光学軸とのなす角、s_1は波長板の厚さ、n_{1o}, n_{1e}はそれぞれ常光と異常光に対する屈折率をあらわします。

ウォラストン ・プリズム

ウォラストン ・プリズムの主軸の方位角をϕとすると、常光に関するミューラー行列は、

$$\begin{aligned}\boldsymbol{I}' &= \boldsymbol{B}_o\boldsymbol{I} \\ &= \tfrac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & \cos 2\phi & \sin 2\phi & 0 \\ \cos 2\phi & \cos^2 2\phi & \frac{1}{2}\sin 4\phi & 0 \\ \sin 2\phi & \frac{1}{2}\sin 4\phi & \sin^2 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{I}\end{aligned} \tag{3.4}$$

となります。

異常光に関しては、

$$\begin{aligned}\boldsymbol{I}' &= \boldsymbol{B}_e\boldsymbol{I} \\ &= \tfrac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & -\cos 2\phi & -\sin 2\phi & 0 \\ -\cos 2\phi & \cos^2 2\phi & \frac{1}{2}\sin 4\phi & 0 \\ -\sin 2\phi & \frac{1}{2}\sin 4\phi & \sin^2 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{I}\end{aligned} \tag{3.5}$$

です。

以上を経た時点でのストークス ・ベクトル

これらの$\lambda/2$ 波長板とウォラストン ・プリズムからなる光学系に入る前の光のストークス ・ベクトルを$\boldsymbol{I}_{\rm o} = (I_0, Q_0, U_0, V_0)$ とし、出てきた光の常光線のストークス ・ベクトルを$\boldsymbol{I}_{1o} = (I_{1o}, Q_{1o}, U_{1o}, V_{1o})$、異常光線のストークス ・ベクトルを$\boldsymbol{I}_{1e} = (I_{1e}, Q_{1e}, U_{1e}, V_{1e})$ とします。また、表記を簡単にするためにウォラストン ・プリズムの主軸を方位角の原点にとると、$\phi = 0^\circ$ですから、常光と異常光おのおのは、

$$\begin{aligned} \boldsymbol{I}_{1o} &= \boldsymbol{B}_o \boldsymbol{A} \boldsymbol{I} \\ \boldsymbol{I}_{1e} &= \boldsymbol{B}_e \boldsymbol{A} \boldsymbol{I} \end{aligned} \tag{3.6}$$

となります。これらのベクトルの各成分は、2 次の微小項までとると次のように導かれます。

$$\left\{ \begin{aligned} I_{1e} &= \frac{I_0}{2}\Big\{1 - \frac{Q_0}{I_0}\cos 4(\psi_1 + \delta\psi_1) - \frac{U_0}{I_0}\sin 4(\psi_1 + \delta\psi_1) \\ &\quad -\frac{(\Delta\tau)^2}{4}\left(\frac{Q_0}{I_0}(1 - \cos 4(\psi_1 + \delta\psi_1)) - \frac{U_0}{I_0}\sin 4(\psi_1 + \delta\psi_1)\right) \\ &\quad -4\Delta\psi_1\left(-\tfrac{Q_0}{I_0}\sin 4(\psi_1 + \delta\psi_1) + \tfrac{U_0}{I_0}\cos 4(\psi_1 + \delta\psi_1)\right) \\ &\quad +8(\Delta\psi_1)^2\left(\frac{Q_0}{I_0}\cos 4\psi + \frac{U_0}{I_0}\sin 4\psi\right)\Big\} \\ Q_{1e} &= -I_{1e} \\ U_{1e} &= V_{1e} = 0 \end{aligned} \right. \tag{3.7}$$

1. $\lambda/2$ 波長板の器械的な回転角精度誤差
   回転方向は一定であるのでギヤの遊びが無いとすれば、回転角の決定精度は 1 パルスの回転角以下と考えて良いと考えられます。すなわち、$\Delta\psi_1 \leq 0.09^\circ \sim 1.57 \times 10^{-3}$rad です。よって、$Q/I,\ U/I \leq 0.1$ の天体に対してこの誤差の 1 次の項が及ぼすエラーは、

   $$0.1 \times 4\Delta\psi_1 \leq 0.063\% \tag{3.8}$$

   程度です。回転角の器械誤差がランダムである場合、このエラーは較正不可能なランダムエラーになります。

   もし、ギヤの工作精度の関係で回転に不一様性があれば、別のエラーの原因になり得ますが、実際に観測されたデータを見る限り、1 パルス以上の大きなエラーはほとんど起こらないと考えられます。これについては、今後さらに調査していく予定です。

2. $\lambda/2$ 波長板の光学等価軸の方位角波長依存性
   実測によると、$\delta\psi_1$ は $4000 - 9000$Å において $\pm 3.5^\circ \sim 0.06$rad の範囲でゆるやかに変化しています。このソフトウェアでは、グラン ・テーラー ・プリズムを挿入した観測によって $\delta\psi_1$ を求めて補正する方法をとっています。処理に関する詳しい記述は、4.3 節を参照してください。

3. $\lambda/2$ 波長板のリターダンスの波長依存性
   Pancharatnam 型$\lambda/2$ 波長板におけるリターダンスも、光学等価軸と同様にゆるやかな波長依存性を示し、$\Delta\tau \leq 3^\circ$ の範囲で変化します。ここでは、$\Delta\tau \leq 6^\circ \sim 0.1$rad が期待されるとして見積もると、$Q/I,\ U/I \leq 0.1$ の天体に対してこの誤差の 2 次の項が及ぼすエラーは、
   $$0.1 \times \frac{(\Delta\tau)^2}{4} \leq 0.027\% \tag{3.9}$$
   と小さい量であることがわかります。

4. $\lambda/2$ の平行平面性 (光の入射角の垂直からのズレ)
   式 3.3より、crystal quartz($5080\mathring{A}$ で、$n_o = 1.54822,\ n_e = 1.55746$) であり、仮に $i \sim 0.5^\circ$だとしても、
   $$\pi - \tau_1 \leq 0.65 i^2 \sim 5 \times 10^{-5}\text{rad} \sim 0.003^\circ \tag{3.10}$$
   と小さな値になります。実際には、典型的に $i \sim 0.01^\circ$程度であることを考えると、この量は 3 の$\lambda/2$ 波長板のリターダンスの波長依存性によるτ_1のずれよりもずっと小さく、無視できます。

5. 較正プリズム (Glan-Taylor prism) の非一様性
   Glan-Taylor プリズムを通る際の光は収束光でかつ、カセグレン焦点面に近いこともあり、プリズムの一様性が問題になります。しかし、$\lambda/2$ 波長板の等価光学軸の補正への影響については、典型的なプリズムの出射光の偏光角の非一様性は、peak-to-peak 値で 0.02°と小さな値であるため、無視できます。

従って、$Q/I,\ U/I \leq 0.1$ の天体に対して、0.1%の精度で偏光測定を行うためには、以下の式を考慮すれば十分であることがわかります。

$$\left\{ \begin{array}{rcl} I_{1o} & = & \dfrac{I_0}{2}\left\{1 + \dfrac{Q_0}{I_0}\cos 4(\psi_1 + \delta\psi_1) + \dfrac{U_0}{I_0}\sin 4(\psi_1 + \delta\psi_1)\right\} \\ Q_{1o} & = & I_{1o} \\ U_{1o} & = & V_{1o} = 0 \end{array} \right. \tag{3.11}$$

$$\left\{ \begin{array}{rcl} I_{1e} & = & \dfrac{I_0}{2}\left\{1 - \dfrac{Q_0}{I_0}\cos 4(\psi_1 + \delta\psi_1) - \dfrac{U_0}{I_0}\sin 4(\psi_1 + \delta\psi_1)\right\} \\ Q_{1e} & = & -I_{1e} \\ U_{1e} & = & V_{1e} = 0 \end{array} \right. \tag{3.12}$$

3.2.2 $\lambda/4$ 波長板以降

次に、常光線と異常光線に分けられた光が CCD 面に届くまでにどのような変換を受けるかの考察を加えてみましょう。

$\lambda/4$ 波長板

$\lambda/4$ 波長板の光学軸の方位角は、あらかじめウォラストン ・プリズムの主軸に対してほぼ $45°$傾いた方位角で設置してありますので、$\delta\psi_2$を誤差分として$\psi_2' = \phi + 45° + \Delta\psi_2$ とおくことができます。また、リターダンスは$\Delta\tau_2$を誤差分として$\tau_2' = 90° + \Delta\tau_2$とおけます。この場合、

$$\begin{aligned} \boldsymbol{I}' &= \boldsymbol{C}\boldsymbol{I} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_2 + H_2\cos 4\psi_2' & H_2 \sin 4\psi_2' & -\sin\tau_2' \sin 2\psi_2' \\ 0 & H_2 \sin 4\psi_2' & G_2 - H_2\cos 4\psi_2' & \sin\tau_2' \cos 2\psi_2' \\ 0 & -\sin\tau_2' \sin 2\psi_2' & \sin\tau_2' \cos 2\psi_2' & \cos\tau_2' \end{bmatrix} \boldsymbol{I} \end{aligned} \tag{3.13}$$

となります。ここで、

$$G_2 = \frac{1}{2}(1 + \cos\tau_2'), \quad H_2 = \frac{1}{2}(1 - \cos\tau_2') \tag{3.14}$$

とおきました。

４５度鏡

４５度鏡の入射面の方位角を χ_1 、４５度鏡の入射面に垂直な振動方向の光に対する反射係数を$\rho_{1\perp}$、入射面に平行な振動方向の光に対する反射係数を$\rho_{1\parallel}$とすると、次のようにあらわせます。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{I}' &= \boldsymbol{D}_1\boldsymbol{I} \\ &= \frac{1}{2}\begin{bmatrix} \rho_{1\perp} + \rho_{1\parallel} & (\rho_{1\perp} - \rho_{1\parallel})C_2 & (\rho_{1\perp} - \rho_{1\parallel})S_2 & 0 \\ (\rho_{1\perp} - \rho_{1\parallel})C_2 & (\rho_{1\perp} + \rho_{1\parallel})C_2^2 + 2\sqrt{(\rho_{1\perp}\rho_{1\parallel})}S_2^2 & (\rho_{1\perp} + \rho_{1\parallel})C_2S_2 - 2\sqrt{(\rho_{1\perp}\rho_{1\parallel})}C_2S_2 & 0 \\ (\rho_{1\perp} - \rho_{1\parallel})S_2 & (\rho_{1\perp} + \rho_{1\parallel})C_2S_2 + 2\sqrt{(\rho_{1\perp}\rho_{1\parallel})}C_2S_2 & (\rho_{1\perp} + \rho_{1\parallel})S_2^2 - 2\sqrt{(\rho_{1\perp}\rho_{1\parallel})}C_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{(\rho_{1\perp}\rho_{1\parallel})} \end{bmatrix} \boldsymbol{I} \end{aligned} \tag{3.15}$$

ここで、$C_2 = \cos 2\chi_1,\ S_2 = \sin 2\chi_1$とおきました。

コリメーター、グレーティング

これらの反射系による変換も、４５度鏡と同様の行列 $\boldsymbol{D}_2$，$\boldsymbol{D}_3$で表されます。サフィックスの違いは、χとρの違いに対応するものとします。

光学系通過後のストークス ・ベクトル

全光学系を通過し、最終的に受光器に照射する光のストークスベクトルを、常光、異常光それぞれ$\boldsymbol{I}_{2o} = (I_{2o}, Q_{2o}, U_{2o}, V_{2o})$、$\boldsymbol{I}_{2e} = (I_{2e}, Q_{2e}, U_{2e}, V_{2e})$ としますと、次のように書けます。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{I}_{2o} &= \boldsymbol{D}_3\boldsymbol{D}_2\boldsymbol{D}_1\boldsymbol{C}\boldsymbol{I}_{1o} \\ \boldsymbol{I}_{2e} &= \boldsymbol{D}_3\boldsymbol{D}_2\boldsymbol{D}_1\boldsymbol{C}\boldsymbol{I}_{1e} \end{aligned} \tag{3.16}$$

ウォラストン ・プリズム以降の光学系は、すべて固定されているものですので、光路が同一の光線に対しては、$\boldsymbol{D}_3\boldsymbol{D}_2\boldsymbol{D}_1\boldsymbol{C}$はひとつの定数行列

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{21} & k_{31} & k_{41} \\ k_{12} & k_{22} & k_{32} & k_{42} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} & k_{43} \\ 0 & k_{24} & k_{34} & k_{44} \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

とみなせます。常光と異常光では光路が異なるので、$\boldsymbol{K}$の値もわずかに異なる可能性がありますが、常光のみ、あるいは異常光のみに対する $\boldsymbol{K}$ ($\boldsymbol{K}_o$, $\boldsymbol{K}_e$) を導入すれば、それぞれは一定ですので、適切なフラットフィールディングによって補正可能です。

一方、実際には、望遠鏡の向きによるたわみや温度変化等によって、この行列の各要素に微小なずれが生じる可能性があります。現在までに得られている様々な方向で撮った無偏光標準星のデータから、これらは上記に掲げた精度と比較して十分に小さいと考えられますが、今後得られる多くのデータに対して、定期的に注意深い検討をしていく必要があります。

また、天気の悪い日や、細いスリットを使用する場合には、ガイドエラーによって、光量がフレームによって大きく変化します。薄い雲は偏光にほとんど影響しません。また、ダイヤフラムにスリットを用いる場合でも、波長の数百倍以上の十分に広いスリット幅で用いる場合は、ほとんど偏光状態に影響しないと考えられます。これは、無偏光標準星の観測で確認済です。よって、これらの影響は、常光と異常光に同じ係数 $\xi(n)$ としてかかると考えられきます。ここで n はフレームごとにつけられる番号とします。よって、最終的に受光器によって受けられる光の強さは、$Q/I,\ U/I \sim 0.1$ の天体に対して、0.1%精度の観測を行なう場合には、

$$I_{2o} = k_{11\ o} I_{1o}\xi(n) + k_{12\ o} Q_{1o}\xi(n) = (k_{11\ o} + k_{12\ o}) I_{1o}\xi(n) = k_{ord} I_{1o}\xi(n) \tag{3.18}$$

$$I_{2e} = k_{11\ e} I_{1e}\xi(n) + k_{12\ e} Q_{1e}\xi(n) = (k_{11\ e} - k_{12\ e}) I_{1e}\xi(n) = k_{ext} I_{1e}\xi(n) \tag{3.19}$$

と書くことができます。実際に $Q/I,\ U/I$を求めるには、式 3.18、3.19 をみると、観測値 $I_{2o},\ I_{2e}$について、$k_{ord},\ k_{ext},\ \xi(n)$ を消去しなくてはなりませんが、このソフトで用いている方法は 4.3 節の各プロセスの説明の頁で述べます。

3.3 受光装置の誤差

CCD は数多くのピクセルからなり、おのおののピクセルは固有の感度特性や、バイアスレベル、ダークレベルを持っています。また、誤差を考える上では、光電子の統計的エラーや読み出しノイズも考慮する必要があります。

ここでは、理想的なビーム・スプリッター (主軸の方位角 ϕ) で常光・異常光に分けられた 2 つの直線偏光した単色光線 $I_o(\phi),\ I_e(\phi)$ が、ある面積をもって CCD に照射する場合を考えてみましょう。理想的というのは、常光と異常光が完全に分けられ、しかも減衰もないということを指し、CCD 面上の常光線は、スプリッターに入射する直前の直線偏光のある振動面の成分と、異常光線はそれと垂直な面内の振動成分と、完全に一致するものとするということです。 (HBS ではビーム・スプリッターにウォラストン・プリズムを使用しています)

ϕ の原点を適当にとった場合、この単色光の、真のストークス・パラメター値 $I,\ Q,\ U$ は、次のようにあらわされます。

$$\frac{Q}{I} = \frac{I_o(0^\circ) - I_e(0^\circ)}{I_o(0^\circ) + I_e(0^\circ)} \tag{3.20}$$

$$\frac{U}{I} = \frac{I_o(45^\circ) - I_e(45^\circ)}{I_o(45^\circ) + I_e(45^\circ)} \tag{3.21}$$

また、偏光度 P と直線偏光の方位角 θ は次のように与えられます。

$$P = \sqrt{\left(\frac{Q}{I}\right)^2 + \left(\frac{U}{I}\right)^2} \tag{3.22}$$

$$\theta = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \tag{3.23}$$

しかし、実際に CCD によって得られる光量の情報 I'_o や I'_e は、それぞれランダムな誤差成分 $\sigma_o,\ \sigma_e$ や、全ピクセルに系統的なカウント誤差 $\epsilon_o,\ \epsilon_e$ を含みます。これらの誤差は ϕ によらない CCD に固有のものであり、直線偏光観測に及ぼすエラーは、式 (3.20)∼(3.23) から、あるひとつのϕの場合のみを考えれば十分であることがわかります。ここでは、$\phi = 0^\circ$の場合に、$\epsilon_o,\ \epsilon_e$ が Q/Iに及ぼす誤差を評価してみます。

3.3.1 ランダムな要因

個々のピクセルの誤差

これには、次のようなもの (単位 ADU) が挙げられ、互いに独立で、ランダムな誤差になります。

1. 読み出しノイズ $\sigma_{readoout}$
   cryocam T-5 における実測値は、改修のたびに少しずつ減少しています。もっとも最

近の、1998 年 2 月に CCD 温度−55°で調査した最新の結果では、表のような結果が得られています。表中の変換効率については、次のポアソンノイズの項を見てください。

GAIN	変換効率 (ADU/e^-)	読みだしノイズ (e^-)
8×8	8.4	7.6 ± 0.8
1×8	1.17	6.86 ± 0.86

2. 光電子のポアソンノイズ σ_S (ref. CCD Astronomy)
あるピクセルの光電子数を N_{photon} 、AD 変換器によって出力される光自身のカウントを S_{photon}(ADU) 、変換率を g とすると、

$$S_{photon} = gN_{photon} \tag{3.24}$$

と表され、電子回路によって他の誤差が生じないとすれば、

$$\sigma_S = g\sqrt{N_{photon}} \tag{3.25}$$

となります。よって分散は、$\sigma_S^2 = g^2 N_{photon}$ですので、

$$\frac{\sigma_S^2}{S_{photon}} = \frac{g^2 N_{photon}}{gN_{photon}} = g \tag{3.26}$$

となり、結局次の式を得ます。

$$\sigma_S^2 = gS_{photon} \quad \mathrm{ADU}^2 \tag{3.27}$$

変換率 gの実測値は、さきほどの表のように、それぞれ 1.17, 8.4 となっています。ただし、1997 年夏の改修以前のテストでは、それぞれがほぼ半分の値となっていましたので、古いデータを参照する際には注意して下さい。

3. ダークのポアソンノイズ
ダークのカウント S_{dark}(ADU) も、光と同様のランダム・エラー成分を生じます。ダークカウントのピクセル間平均値は、実験の結果 gain 8×8 において $S_{dark} = 88.2 \times 10^{T/22.2}$ ADU/sec/pixel (Tは CCD 温度) です。

4. スカイのポアソンノイズ
スカイのカウント S_{sky}(ADU) の示すランダム・エラー成分も存在します。スカイのカウントは、1997 年 1 月の暗夜の実験では、gain 8×8 において、2 つ穴のダイヤフラム中央の Vバンド付近では、$S_{sky} = 0.2t$ ADU/sec/pixel (t は積分時間) でした。

5. フラット化の誤差
ピクセルごとのフラット自身の持つエラー e_{flat}は、フラット化によるランダム・エラー $e_{flat}S_{phton}$ ($|e_{flat}| << 1$) として効いてきます。誤差はほとんどオブジェクトフ

レームによって決まるようにすることが理想的ですので、充分にカウントを多くとっておく必要があります。その場合、この誤差は無視できるでしょう。たとえば個々のピクセルのもっている誤差の割合が、1%よりも小さくなるためには、ゲインが 8×8 の場合で 8.4 万 ADU が必要ということになります。光量が少ない波長域では、数時間の積分が必要になってきます。

6. 積分中のガイドエラー等による誤差
ＨＢＳでは分散素子として回折格子を用いていますが、これは常光と異常光とに対する反射効率比$\kappa(\lambda) = k_{ext}(\lambda)/k_{ord}(\lambda)$ の波長依存性が大きいため（図 3.3参照）、フレームごとの積分中のガイドエラーの違いを主として、数ピクセル程度の波長合わせのミスや、シーイングの変動、常光と異常光でのフォーカスの差などによる像の違いなどが、シーイングサイズかそれより若干大きめの比較的周波数の高い $(\Delta\lambda = 50 - 200\text{Å})$ ギザギザした誤差σ_{Gerr}を生み出します。これは、フレームごとの（正確には、波長板方位角によって得られる’ペア’ごとの）ほぼランダムな誤差になると考えられます。

この誤差量を、通常モードと 2 方位モード（4.3 節、「各プロセスの説明」の器械系ＩＱＵ導出の項を参照してください）の 2 種類で見積もってみましょう。波長域によりますが、無偏光星の観測によって $\mathrm{d}\kappa(\lambda)/\mathrm{d}\lambda \cdot (1/\kappa) = 0.02 \sim 0.5(\%\ /\text{pixel})$ が得られています。つまり、この値はすでに星の PSF(Point Spread Function) で convolution をとったものになっているため、そのままガイドエラーや波長合わせのエラーによるシフト量と対応させることができます。一方、ガイドエラーの実測値は、σ で $0.5 \sim 1$ arcsec、すなわち $2 \sim 4$pix、波長合わせのエラーは$\sigma = 1$pix です。また、イメージサイズは日によって 10∼20 pixel$(2''.5 \sim 5'')$ と変化します。常光と異常光との比から偏光度を出す通常モードにおいては、イメージサイズの変化は少なく、ほとんど効きません。この場合、フレームごとのガイドエラーの違いが主な要因となります。極端な場合（例えば emission line 成分がドミナントで、積分時間が短くオートガイドによって望遠鏡が振られる回数が 1 ~ 2 回）において、σ_κにして $0.5 \times 4 = 2\%$ なので、$\sigma_{Gerr} \sim 2\sigma_q \cdot S_{photon} \sim \sigma_\kappa \cdot S_{photon}$ となり、最大 2% 程度のエラーを生じ得ることがわかります。経験的には、通常のシーイングにおける観測で、σ_qにおいて $0.05 \sim 0.3\%$程度です。このエラーは、正確な波長較正や、適当なビンニング、複数フレームの平均化によって、ある程度まで軽減できます。次に 2 方位モードの場合ですが、別の日に撮ったデータ同士の比較になるため、日ごとのシーイングサイズの違いが大きく効きます。特に、2 つ穴ダイヤフラムを用いたイメージ分光では、天体のスペクトルタイプによる$\kappa(\lambda)$ の違いも無視できない量になります。典型的には、$0.1 \sim 1.0\%$ のエラーを生じます。このエラーは、正確な波長較正や、適当なビンニング、似たスペクトルタイプの較正データを用いることによって、ある程度まで軽減できますが、日ごとのシーイングの違いがドミナントな場合が多いため、ある晩に撮った複数フレームの平均では軽減できないことがあります。

これらから、個々のピクセルのもつエラー σ_{onepix} についての次の式を得ることになります。

$$\sigma_{onepix}^2 = g(S_{photon} + S_{dark} + S_{sky}) + \sigma_{readout}^2 + (e_{flat}S_{photon})^2 + \sigma_{Gerr}^2 \tag{3.28}$$

全ピクセル和のカウントのもつ誤差

光を受けるピクセル数 $N = N_{sp}N_{wl}$(Nをある矩形領域全体のピクセル数とし、N_{sp}をスリット長方向の、N_{wl}を波長分散方向のそれぞれピクセル数とする) で、式 (3.28) の和をとった、ピクセル和の誤差 σ_{pixsum} を考えてみましょう。

$$\sigma_{pixsum}^2 = g\sum^{N}(S_{photon} + S_{dark} + S_{sky}) + \sum^{N}\{\sigma_{readout}^2 + (e_{flat}S_{photon})^2 + \sigma_{Gerr}^2/N_{wl}\} \tag{3.29}$$

ここで、$\sigma_{readout}$, gは、ピクセルごとに違う量ですが、現実的にはピクセル間平均の量の方が求めやすく、かつそれを用いた見積りで十分と考えられます。また、フラット化のランダム・エラー e_{flat}は、ビンニングすることによって軽減される量ですが、実際のスペクトル像におけるスペクトルの空間方向の断面の半値幅が $\sim N_{FWHM}(\mathrm{pixel})$ であり、ビンニングする波長領域内 $(N_{wl}\ \mathrm{pix})$ ではカウントの分布が波長によらないとすれば、ビンニングしたカウントに及ぼす影響は、

$$\frac{e_{flat}}{\sqrt{N_{FWHM}N_{wl}}}$$

であることから、$e_{flat} = 1\%$ を達成していれば、通常 $N_{FWHM} = 12\mathrm{pix}$ ですから、$100\text{Å}(18\mathrm{pix})$ ビンニングで、0.068% を達成できることがわかります。ここでは、器械系のエラー (第 4 章 3.2節 参照) によって上限の決まっている 0.1% 精度の観測を想定し、このエラーを無視します。

以上のことから、現実的なエラーの表式として、次のようなものを得ることができます。

$$\sigma_{pixsum}^2 = g\sum^{N}(S_{photon} + S_{dark} + S_{sky}) + N\sigma_{readout}^2 + \sigma_{Gerr}^2/N_{wl} \tag{3.30}$$

CCD 温度$-60°$、G 型で$\lambda \sim 6000\text{Å}$ において、100 秒積分したフレームで、100Å ビンニングした場合のトータルなランダムな誤差は、1 フレームあたり図 3.4の実曲線のようになります。HBS の場合、CCD が空冷なので積分時間には数百秒までという制限があるため、さらにランダムな誤差を小さくしたい場合には、積分時間を低く抑えた上で枚数を稼ぐのが常套手段になります。

実際には、この曲線よりも数倍エラーが大きく、10 倍程度のフレーム数を要する場合もありますが、これは積分中のガイドエラーやシーイングの変化によるエラー σ_{Gerr} が主な原因であると考えています。典型的な量を、グラフ右部に示しておきました。これは、天体の明るさに依存しない量で、図 3.4において水平に伸びる直線になります。これらは、Q/I や U/Iを計算する 2 フレームからなるペアごとの、ほぼランダムなエラーと考えられますので、$\sim \sqrt{2/N_{wl}}$ の依存性を持つものと推測されます。

3.3.2 系統的な誤差要因

これまで挙げた誤差要因に加えて、画像処理上、または較正上の処理の不完全さから生じる系統的な誤差要因も含める必要があります。

個々のピクセルの誤差

1. ダークの系統誤差
   ダークの差し引きが不完全であることによって生じるエラーです。これは、全ピクセルに系統的な誤差 δS_{dark} に分類できます。

2. スカイの系統誤差
   系統的な誤差をδS_{sky} とします。

3. 散乱光による系統誤差
   散乱光による系統的な誤差 (にじみ等も含む) をδS_{sca} とします。

全ピクセル和のカウントのもつ誤差

N_{pixel}ビンニング後の系統的なカウント誤差は、次のように表されます。

$$\epsilon_{pixsum} = N(\delta S_{dark} + \delta S_{sky} + \delta Ssca) \tag{3.31}$$

δS_{dark}については、なるべく軽減するために、ダーク差し引き後の画像で、光の来ない領域のカウントがゼロになるような処理を行なっています (4章 4.3節参照) が、フレームによっては、数十 ~ 数百ピクセルスケールの数 ADU(gain 8×8) 非一様なエラーがある場合があり、自動的に検知して除去することが非常に難しいため、エラーとして残ります。

このような (除去不能な) 系統誤差は、常光、異常光それぞれのスペクトルに対して、

$$I'_o = I_o + \epsilon_o = I_o + \delta S_{dark\ o} + \delta S_{sky\ o} \tag{3.32}$$

$$I'_e = I_e + \epsilon_e = I_e + \delta S_{dark\ e} + \delta S_{sky\ e} \tag{3.33}$$

となります。これらの系統的な誤差量をカウントに対する比率であらわし、

$$\epsilon_o = e_o I_o,\ \epsilon_e = e_e I_e \tag{3.34}$$

とすると、これら $e_o,\ e_e$の微小項は、真のストークス ・パラメター $I,\ Q$ に対して、次のように効いてきます。

$$\frac{Q'}{I'} \simeq \frac{Q}{I} + \frac{1}{2}(e_o - e_e) - \frac{1}{2}\frac{Q}{I}(e_o + e_e) \tag{3.35}$$

つまり、常光と異常光とで傾向が異なるカウントの系統誤差については、カウントに対する誤差比程度のエラー、常光と異常光とで傾向が同じ系統誤差については、Q/Iに対する誤差比程度のとなります。

ＣＣＤの読みだし方向は、常光と異常光に分かれる方向、かつ、スリット長方向ですので、ダークやスカイに関しては、常光と異常光とで傾向が違うエラーは生じにくい構成になっています。経験上は、100Å ビンニング、偏光度があまり大きくない天体の場合で、$|e_o - e_e| \leq 0.05\%$ (上記のダーク補正処理をした後)、$|e_o + e_e| \leq 0.5\%$ 程度です。偏光度が極端に大きい天体 ($P \sim 100\%$) の場合には、散乱光 (にじみ) の影響で $|e_o - e_e| \sim 1\%$ に達する場合があり、整約ソフト ver.2 ではその補正を行なっていませんので、注意が必要です

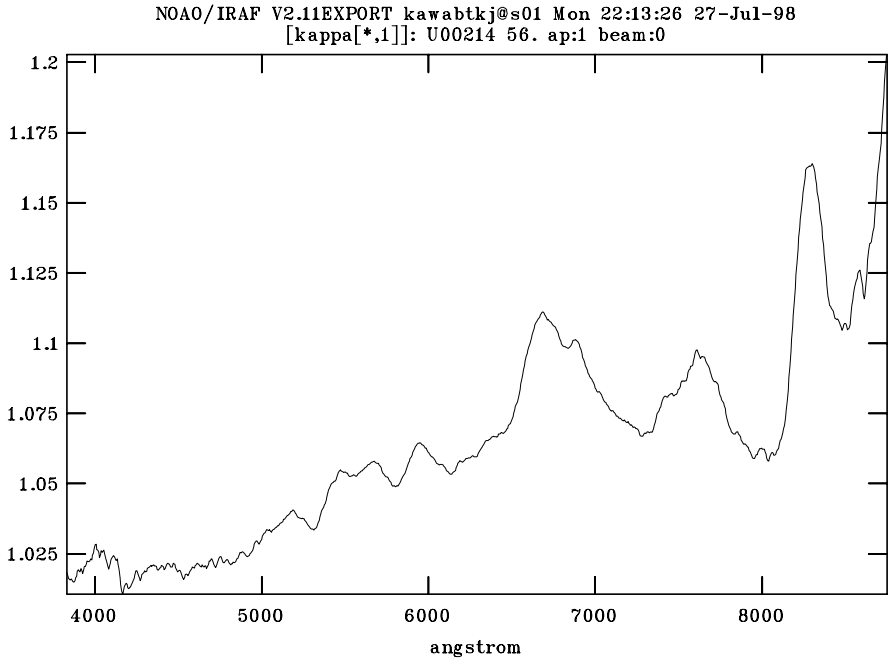


図 3.3: 無偏光標準星の観測による異常光と常光との効率比$\kappa(\lambda) = k_{ext}(\lambda)/k_{ord}(\lambda)$ の波長依存性。観測は 1998 年 3 月に行なわれ、ダイヤフラムは 2 つ穴の下穴が使われたデータです。このように、$\kappa(\lambda)$ は、数百Å スケールでギザギザの波長依存性を示すため、較正には注意が必要になります。本文参照のこと。

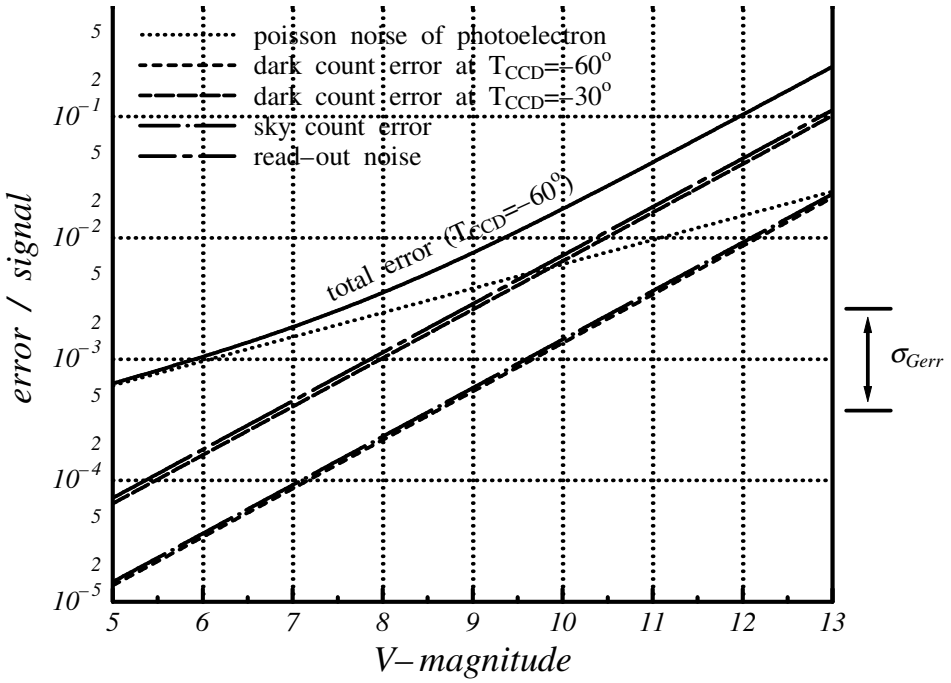


図 3.4: G 型星 100 秒積分 1 フレームあたりの誤差評価。$\lambda \sim 6000$Å 付近で、100Å 幅でビンニングした場合の通常モードの整約におけるランダムな誤差について計算してあります。縦軸がカウントの誤差、横軸が V 等級をあらわしています。実曲線が CCD 温度が-60°の場合のトータルな誤差を示しています。各誤差成分は、グラフ上では直線で表されています。一方、ガイドエラーによるエラーσ_{Gerr}は、等級に依存しない定数として効いてくる量で、グラフ右部に典型的な値を示しています。１０組以上のペアを平均することにより、ほとんどの場合で $\sigma_{Gerr} leq 0.1\%$にすることができます。

第 4 章 4

整約の流れと較正法

本ソフトウェア (HBSRED) は、ＨＢＳの標準的な観測モードで得られたデータを、合理的、半自動的に整約できるよう開発されています。

ここでとりあげる整約法は、 2 つ穴ダイヤフラムを用いて撮影したデータを対象としたもので、「2 つ穴整約法」と呼んでおり、HBSRED はこの方法に準拠しています。

ＨＢＳの整約ではこれ以外に、大穴ダイヤフラムを用いて撮影したデータを整約する「1 つ穴整約法」も開発を進めた経緯があり、特にスカイ差引きのプロセスで 2 つ穴整約法との間に相違がありますが、現在の配付には含まれていません。

4.1 整約の流れ

本整約ソフトウェアは、大きくわけて、ＣＣＤを用いた多くの観測で共通の処理を行なう一次整約部と、偏光観測に特有の較正を行なう較正部に分けられます。

4.1.1 1 次整約部

一次整約では、データのグルーピング、ダーク (バイアス) の差引、トリミング、ピクセル感度ムラ補正、画像変換、フラットニング、スカイ差引、波長較正、ビンニングなどが行なわれます。1997 年度現在使用されている検出器では、外気温によってバイアスが変動することが確認されていているため、ダークの差引時に CCD 上で光の届かない領域のカウントを用いた補正を行なっています。

画像変換においては、波長分散方向と X 軸、およびスリット長方向と Y 軸とが完全に対応するように、また、常光と異常光にわけられた 2 つの像の各位置 (x, y) が、 1 対 1 で対応するように、全カウント数を保存しつつ、画像をスケーリングします。これによって、常光と異常光の 2 つの像がゆがみなく、 (位置において) 完全に重なるようになります。常光、異常光間の対応をとることは、現実の光学系において、常光と異常光との拡大率 (異常光の方が $0 \sim 10\%$ 大きい) やゆがみの性質が、波長やスリット上の位置によって異なることから、特に、恒星のような点源のデータと、空間的に広がった天体 (e.g. nebulae,

sky) のデータとのスペクトルの 1 次元化における系統差を無くすために重要です。

フラットニングには、スカイ成分を差し引くために、ターゲット穴とスカイ穴とのダイヤフラム形の違いを補正するためのフラットと、ダイヤフラム内でのスリット長方向のケラレ補正を補正するためのフラットの 2 種類があります。

波長較正については、ダイヤフラム中央位置での較正が、上記画像変換において行なわれています。しかし、個々のフレームにおいてはガイドエラーによる中央からの位置ズレが存在します。この補正は、スペクトラルフィーチャーを参照した平行移動によって行なわれています。ダイヤフラム中央位置での波長分散と、中央からのずれた位置での波長分散は単なる平行移動では表されないことが確認されていますが、その量は径の 4 分の 1 程度の位置ずれであれば、 $\leq 1.5\mathrm{pixel}(\sim 8\text{Å})$ であることが確かめられており、ダイヤフラムの端に近くない限りは同じ分散式を使っても 10Å 精度で正しいことがわかっています。

4.1.2 較正部

較正部では、ストークス ・パラメーターの導出や、複数の同データの平均化が行なわれるとともに、座標系の変換 (器械系→赤道座標系) が行なわれます。

ストークス ・パラメーターの導出には、$\lambda/2$ 波長板の方位角が $0.0°$、$22.5°$、$45.0°$、$67.5°$ の 4 種類のデータから計算する方法を通常モードとして採用しています。通常モードでは、式 $3.11, 3.12,\ 3.18, 3.19$における $k_{ord},\ k_{ext}$ の消去が自身のデータで行なえるため、シーイングの影響が出やすいイメージ分光において較正が単純になるだけでなく、精度も高いものになります。$\lambda/2$ 波長板の方位角が $0.0°$ と $22.5°$の 2 種類の方位角のデータしかない場合には、無偏光標準星 (U P 星、後述) から求めた $k_{ord},\ k_{ext}$ を用いて較正する方法である 2 方位モードが採用されますが、k_{ext}/k_{ord}が波長によって $1.0 - 1.2$ の間で激しく変動するため (図 3.3参照)、シーイングやカラーの違いの影響で、数十∼百数十Å 幅の、peak-to-peak で $\Delta P = 1\%$ 程度のギザギザなエラーを生じる場合があるので、注意が必要です。同種のエラーは、通常モードにおいても、フレームごとのガイドエラーでもわずかに生じる場合があります (典型的には $\leq 0.2\%$)。このようなエラーを少なくさせるためには、シーイングの良い (安定した) 日に 4 方位で観測してもらうことがベストですが、ソフト的にも、波長較正を正確に行なったり、スペクトル分布に合わせて適当な波長幅でビンニングするなどの対処をすることで、ある程度は可能になります。このようなエラーを減少させるため、本ソフトウェアでは、波長ビンニングの仕方を専用のテーブルによってユーザーが簡単に指定できるようにしているほか、 2 方位モードにおいては、天体のカラーに合わせて較正データを指定できるようにしてあります (ver.2 では、 2 種類のカラーを準備しています)。さらに、フレームごとの波長合わせの際には、スペクトル分布で相関をとることによって、(同じグループ内で相対的には) 非常に精度の高い波長較正を実現しています。ただし、最終的なテーブルに出力される $I(\lambda)$ については、1% 程度の誤差で十分であることと、計算上の整約、および相対測光の際の便宜 (同一の$\lambda/2$ 波長板方位角のデータのみからでも導出できるようにするため) から、標準星の観測による k_{ext}/k_{ord} を用いた較正がなされたものを採用されています。

4.2 プロセス一覧

図 4.1に、本ソフトウェアで実行される個々のタスクと、それによってできる画像ファイル名の拡張子の一覧を掲げました。これらのタスクを前処理 (hbsinit.cl) を実行すれば、それ以後のタスクは、統合化されたひとつのプログラム hbsred.cl を実行することで、すべて自動的に処理することができます。ここで、.cl という拡張子のついたものは、CL-script で書かれたプログラムを、また、.c という拡張子のついたものは C 言語で書かれたプログラムを、それぞれ用いていることを表しています。

4.3 各プロセスの説明

1. 前処理 (hbsinit.cl)
    - ユーザー環境変数設定
    - その他の環境変数設定
    - 較正画像データの画像変換 (初回のみ)
    - C-program のコンパイル

表 4.1: 整約ソフトウェアで使われるタスクやプログラムの一覧。生成画像拡張子とは、そのタスクで生成される画像ファイル名の拡張子を示しています。6 番の異常ピクセル補正は、ファイルの上書きをするため同じ拡張子のままになっています。8 番の切りとり以降は、1 つの画像から 4 本のスペクトルが切り出されますので、おのおのの画像にさらにθが imh の前につけられます。θは、1 フレームの中にうつる 4 本のスペクトルの番号で、上穴から下穴のほうへかけて、それぞれ 1 から 4 へと割り振られています。12 番のスペクトル一次元化以降は、番号θの代わりに、異常光か常光かを示す 1 文字 e か o (e/o と表記) がつけられます。$n = 1, 3$ が e で、$n = 2, 4$ が o です。objは、2 番のデータのグルーピング時につけられるグループ名で、object 名 + 同 object 名間の番号というものになっています。nは、同グループ内でつけられる 0 度-45 度組の番号です。較正データについては、***はダイヤフラムによって異なる 3 文字、?は$\lambda/2$ の方位角を表す 1 文字ですが、詳しい記述は、較正データの内容の項に書かれています (4.3.2 節参照)。

順番	処理内容	タスク ・プログラム名	生成画像の拡張子	参照するファイル名
	前処理	hbsinit.cl, hbsccmpl.cl	—	—
1.	ファイル変換	hbsfconv.cl, cryofits3.c	fit	— cryolist.dat, object.lst
2.	データのグルーピング	hbsgroup.cl	—	—
3.	ダーク平均化	hbsdarkave.cl	—	—
4.	ダーク差し引き	darksub.cl, hotpixtab.c	d	—
5.	トリミング	hbstrim.cl	tr	hbsdifine,h
6.	異常ピクセル補正	hbsbadpix.cl	tr	badcol_TI.dat, badpix_TI.dat
7.	ピクセル感度ムラ補正	hbspixsens.cl	px	HBS.***.pxs.imh
8.	1 対 1 対応切り取り	hbsextract.cl, hbstfx.c hbstfy.c	px.θ	hbsdefine.h
9.	スカイ差し引き	hbsskysub.cl	sk.θ	HBS.***.1t?.px.θ.imh
10.	波長合わせ	hbsarrange.cl, hbsshift.c	sf.θ	HBS.feature.*
11.	第二フラット化	hbsflat2.cl	fl.θ	HBS.2HL.2t?.ft.θ.imh or HBS.2S2.1t?.ft.θ.imh
12.	スペクトル一次元化	hbs1d.cl hbs1dsub.c	od.e/o	—
13.	ピンニング	hbsbin.cl	bn.e/o	HBS.obj.bintab
14.	ＩＱＵグルーピング	hbsiqugroup.cl	—	—
15.	器械系ＩＱＵ導出	hbsiqumake.cl	HBS.obj.q.n.imh HBS.obj.u.nnn.imh HBS.obj.i1.nnn.imh HBS.obj.i2.nnn.imh	
16.	グループ内平均	hbsiquave.cl hbsaverage.cl	HBS.obj.q.ave.imh HBS.obj.u.ave.imh HBS.obj.i1.ave.imh HBS.obj.i2.ave.imh	HBS.iqu.list KAP.***.$t?.imh
17.	消偏光、偏光方位角補正	hbsmktable.cl, hbsiqupt.c interpol.c	obj.xy	upcor.***$, gtcor.***$ spave.***$ HBS.ave.list, HBS.obj.bintab

流れ図		用いられる iraf のマクロコマンド
前処理	.....	**hbsinit, hbsfconv**
⇓		
Dark 画像差し引き	.....	**hbsdarkave, hbsdarksub**
⇓		
トリミング	.....	**hbstrim**
⇓		
Bad Pixel 補正	.....	**hbsbadpix**
⇓		
Pixel 感度補正	.....	**hbspixsens**
⇓		
スペクトルの歪み補正	.....	**hbsextract**
⇓		
Sky 差し引き	.....	**hbsskysub**
⇓		
波長較正	.....	**hbsarrange**
⇓		
フラットニング	.....	**hbsflat2**
⇓		
スペクトル 1 次元化	.....	**hbs1d**
⇓		
波長ビンニング	.....	**hbsbin**
⇓		
Stokes Parameter 導出 (器械系)	.....	**hbsiqugroup, hbsiqumake**
⇓		
複数データの平均	.....	**hbsiquave**
⇓		
Stokes Parameter 導出 (該当座標系)	.....	**hbsmktable**

表 4.2: 整約での大まかな流れ

このタスクでは、本整約プログラムの納められているディレクトリや、その他環境変数の指定を行った後、C プログラムのコンパイルを行います。まず、整約しようするデータファイルと、そのファイルの天体名やデータタイプ等を記述したリストファイル (cryolist.dat, object.lst) を、適当なディレクトリに展開してもらいます。そのディレクトリ名は自由ですが、観測日や天体名にしておくと便利だと思います。そのディレクトリを作製するディスクには、データ量によりますが、数百メガ ~ 数ギガバイトの空き容量が必要であることを頭に入れておいて下さい。次にそのディレクトリに、hbsinit.cl をコピーします。このファイルは、本ソフトウェアのなかに含まれています。そして、コピーしたファイルの中の最初の部分で、必要なものを適宜書き換えておきます。これらは、どのディレクトリに入った較正データを用いるのか、用済みのファイルは逐次消すのか、などを設定する部分です。詳しくは、5.1 節の整約ソフトウェアの実行の初期設定に関する頁を参照して下さい。

なお、すべてのプロセスの画面への出力は、作業ディレクトリ内のファイル (HBS.log) に記録されますので、結果を見て怪しい点などあった場合は、御参照下さい。

2. ファイル変換 (hbsfconv.cl)

   - cryfits3 の実行 (*.fts, cryolist.dat, object.lst から *.fit)
   - FITS 形式から、IRAF 形式への変換 (rfits *.fit * *.fit)

   このタスクでは、cryocam が排出した FITS ファイル (拡張子 fts) に対し、各ファイルの天体名やデータタイプ等を記述したリストファイル (cryolist.dat, object.lst) を参照しながら、ヘッダー情報の整った新たな FITS ファイル (拡張子 fit) を作成し、その後、IRAF 形式 (拡張子 imh, pix) に変換します。リストファイルの形式については、整約ソフトウェアの実行の 5.1 節の初期設定に関する頁を参照して下さい。

3. データのグルーピング (hbsgroup.cl)

   - データのグループ化

   同じオブジェクト、積分時間、ダイヤフラムのフレーム同士を、各フレームのヘッダーの情報を参照しながら行います。ひとつのグループ内のデータは、通常はオブジェクトフレーム、ダークフレーム、バイアスフレームから成ります。同じグループ内のオブジェクトデータは、データのＳ／Ｎを上げるために平均化されます。もし、同じオブジェクト、積分時間、ダイヤフラムのデータ群でも別々に平均化したい場合には、あらかじめ別ディレクトリにおいてオブジェクト名を M42_01, M42_02 などと別にしておくと楽です。なお、このプロセスの最後には、各グループの処理パラメーターを決定する hbsparam.cl が実行されます。hbsparam については後述。

4. ダーク平均化 (hbsdarkave.cl)

   - 同じダークをグルーピング (モード３種)

- バイアス調整
- 平均化 (宇宙線除去)

このタスクでは、ダークのＳ／Ｎを上げるため、かつ宇宙線を除去するために、複数のダークを平均化します。

まず、３種類の方法でグルーピングします。デフォルトでは、データのグルーピングと同じグルーピングになるが、ダーク収得数が少ない場合は、ダイヤフラムを無視したグルーピングか、あるいは積分時間のみのグルーピングをして、枚数を稼ぎましょう。これは、hbsinit.cl の中の _fg_dark の設定を変更することによって行います。該当する行のコメント文をみれば、どのように変更すれば良いかわかります。次に、ＴＥＣ温度によるバイアスレベル短時間変動の補正を行います。これは、ひとつのグループ内のすべてのダーク画像のカウントメジアン値が、最初のフレームと同じになるよう、各フレームごとの定数を決定して、全ピクセルに足し引きすることによって行います。最後に、そのダーク画像をピクセルごとに 3σ rejection を施しながら平均します。

5. ダーク差し引き (hbsdarksub.cl, hotpixtab.c)

- 該当するダークフレームを差し引く
- ホットピクセル補正
- バイアス補正

まず、平均化されたダークフレームの中から、最も適当なものを見つけて差し引きます。同じデータグループのものが最優先されますが、無い場合には、オブジェクトと積分時間が同じでダイヤフラムが異なるものが採用され、それも無い場合には、積分時間が同じものが採用されます。次に、ダークフレームのカウントが 5000ADU を超えるピクセルについて、オブジェクトフレームの同じピクセルのデータを、そのまわりのピクセルの値を用いて内挿を行います。これは、そのダーク自身の決定精度が低く (gain 8×8 で、＞数百 ADU のバラツキ)、データに悪影響を及ぼすために行います。最後に、ＴＥＣ温度によるバイアスレベル短時間変動の補正をフレームごとに行います。足し引きの定数は、光の当たっていない画像のほぼ左下はじの１万ピクセル、左上の１万ピクセル、右下の１万ピクセル、および右上はじの１万ピクセル (hbsdarksub.cl 冒頭の x1-x4, y1-y4 で定義) のそれぞれのカウントメジアン値をもとめ、その４値の平均値を採用しています。なお、1999 年配布のバージョンでは、この４値のバラツキが異常である場合には、シャッター動作不良の可能性を表示し、程度によって、warning を表示したり、そのフレームを削除したりします。これらの結果は、hbsdarksub.cl に書き込まれます。

6. トリミング (hbstrim.cl)

- 画像の上下をカット

まわりの不要部分をカットします。光が来ない領域は、以降の計算に対して時間的にもディスク空き容量に関しても無駄なので、カットしておきます。現在の TI CCD では、1000×1018pix から、1000×431pix までトリミングしていますが、トリミングする領域の情報は、較正データのひとつ `hbsdefine.h` に書かれています。

7. 異常ピクセル補正 (`hbsbadpix.cl`)

   - バッドピクセル, バッドコラムの補正

   あらかじめ登録されている異常な特性をもったピクセル領域である、「バッドピクセル」、「バッドコラム」のカウントを、まわりのピクセルのカウントを用いた内挿で求めます。異常ピクセル領域の座標は、較正データのひとつ、`badpix.dat` に書かれています。

8. ピクセル感度ムラ補正 (`hbspixsens.cl`)

   - 感度ムラ補正用フラット画像で割る

   ピクセルごとの感度ムラを、あらかじめ用意したフラットフィールドフレームで割ることによって補正します。そのフラットフィールドフレームのファイル名は、`hbsinit.cl` の中で、各ダイヤフラム用に "FLAT.1HL.pxs, FLAT.2HL.pxs, FLAT.2S2.pxs" と定義されています。

9. 1 対 1 対応切り取り (`hbsextract.cl, hbstfx.c, hbstfy.c`)

   - 1 対 1 対応画像変換
   - スペクトル切り取り

   これは以下の 2 つのコマンドからなります。前者が像のゆがみや常光と異常光とのスケールの違いを補正する画像変換を行い、後者がスペクトルの切り取りを行います。

   (a) C_{dist} 1 対 1 対応画像変換
   1 対 1 対応のテーブル (`f1to1we.tbl, f1to1wo.tbl, f1to1se.tbl, f1to1so.tbl`) に従い、常光と異常光とで別々に画像の X Y スケーリングを行います。画像変換の方法は次の通りです。まず、波長方向のゆがみを 2 1 箇所で 5 次、スリット長方向のゆがみを 2 5 箇所で 3 次の多項式で記述し、それら縦横あわせて 4 6 本の曲線のテーブルが、常光、異常光とで 2 種類用意されています。これが、上記の 1 対 1 対応のテーブルです。このテーブルを参照し、X 方向が波長分散方向、Y 方向がスリット長方向に対応するように、全カウントを保存しながら常光、異常光それぞれで画像変換します (7 次式補正)。この際、X 座標は波長とリニアな関係になるように座標変換しています。Y 座標については、異常光の像の大きさが変換前とほぼ同じになるようにしています。

(b) スペクトル切り取り
2 つ穴ダイヤフラムほぼ一杯の 1000×90pixel の細長い像に切り取ります。切り取る位置は、較正データのひとつ hbsdefine.h の中の DY1_***と DY2_*** とで定義されています。***は、ダイヤフラムの種類を表します。円形 2 つ穴ダイヤフラム (通称 2 つ穴ダイヤフラム) なら 2HL、0.2mm 幅スリットダイヤフラム (通称 コメットダイヤフラム) なら、2S2 です。

10. スカイ差し引き (hbsskysub.cl)

- 第 1 フラットで割る
- バックグラウンドスカイの差引
- 第 1 フラットを掛ける

バックグラウンドスカイ成分を差し引きます。これに先だって、2 つ穴の径の違いを補正するためのフラット :第 1 フラット (ダイヤフラム像にかからない程度に分光器スリットを拡げて撮った昼スカイ) で画像を割ってやります。その後に、星穴のスペクトルから、対応するスカイ穴のスペクトルを差し引きます。その後、第一フラットを掛け戻すことによって、スカイ成分を引いた生のカウントを再現しておきます。ただしこの処理は、スカイ輝線が強く出る暗天体の観測では、ダイヤフラム縁の部分が完全に差し引かれない可能性があるため、注意が必要です。

11. 波長合わせ (hbsarrange.cl , hbsshift.c)

- 波長同定
- 画像シフト

ガイドエラーの影響で、各画像では像位置が異なっています。これを補正するため、像位置と波長とが 1 対 1 で対応するように波長方向にシフトをします。波長を同定するために、まず 1 枚目の常光と異常光とを足したスペクトルの特徴的な最大 2 つのスペクトル ・フィーチャーを用いています (適当な種類を選択)。2 つのフィーチャーでの同定の差が 7 ピクセル以上ある場合は、マニュアルで入力するモードになりますので、同定結果を参考にピクセル単位でずれ量 (ピクセル単位) を入力してください。

その後、同じグループのスペクトル分布同士で自動的に相関をとることにより、各画像のシフト量を決定して補正します。画像ごとのシフト量は、'HBS.xsft.log' に記録されます。

12. 第二フラット化 (hbsflat2.cl)

- 第 2 フラットで割る

各スペクトル内での透過 / 反射効率分布の Y 方向のムラを補正します。ここで用いるのは、丸穴ダイヤフラムの影響をうけない昼スカイのフラットフィールド画像を無偏

光化したもので、Ｓ／Ｎを上げるためにＹ方向に 2 次曲線をフィッティングしたものです。

13. スペクトル一次元化 (hbs1d.cl, hbs1dsub.c)

    - スペクトル Y ピーク位置の決定
    - Y 方向カウント積分

    スペクトルをスリット長方向に積分し、一次元スペクトル画像を作ります。画像ごとのピーク位置は、'HBS.ysft.log' に記録されます。

14. ビンニング (hbsbin.cl)

    - ビンニングのテーブルを作成又は参照
    - ビンニング

    2 つ穴ダイヤフラムでの観測の場合、実質的な波長分解能はシーイングサイズで決まっているため、波長方向にわたり適当なピクセル幅でビンニングしてＳ／Ｎを稼ぎます。このタスクでは、電子数統計ノイズが一定になるように波長が短い方から可変幅でビンニングするモード (1999 年配布バージョンより) のほかして、積分指定した X ピクセルの範囲のカウントを足すモードや、走査平均 (running-mean) が選択できます。さらに別オプションとして、あらかじめどのようにビンニングするかのテーブルを作っておいて、複雑なビンニングのモードを指定することもできます。これらの情報は、hbsparam を実行することにより、前もって指定しておきます。特に輝線や吸収線の強い天体では、波長分解能がシーイングやガイドエラーによって異なることと、常光と異常光との反射効率比の波長依存性が大きいことによって、うまくビンニングしないと精度が得られませんので、上手に活用してください。

15. ＩＱＵグルーピング (hbsiqugroup.cl)

    - $Q/I,\ U/I$を求めるためのグルーピング

    器械系のQ/Iは、$\lambda/2$ 波長板方位角が 0.0 度のフレームと 45.0 度のフレームから、同じく U/Iは、22.5 度のフレームと 67.5 度のフレームからそれぞれ求めますが、最も近い時刻どうしペアを作ります。たとえば、$0.0,\ 22.5,\ 45.0,\ 67.5,\ 0.0,\ 22.5$,... という順に撮った場合、$Q/I$は、最初の $0.0,\ 45.0$ の組と、最初の 45.0 と 2 回目の 0.0 度の組からもとめる具合にペアをつくります。

16. 器械系ＩＱＵ導出 (hbsiqumake.cl)

    - モード選択 (通常モード、測光モード)
    - $Q/I, U/I, (I)$ を計算

前処理でグルーピングされたペア画像の常光と異常光スペクトルから式 3.12、3.11、3.19、3.18 に従ってストークスパラメターを求めます。

計算には以下の 3 通りを用いることができますが、$\lambda/2$ 波長板の方位角が 4 方位あるセットについては、デフォルトでは 「通常モード」が使用されます。通常モードでは、天候が安定しない夜や、コメットダイヤフラムを用いた観測など、光量の変動がある場合でも、それによらず、安定して $Q/I,\ U/I$を求める方式を使っています。 「測光夜モード」では、光量が安定しているとして、常光同志、および異常光どうしで $Q/I,\ U/I$を求め、平均する方法です。 「測光夜モード」での利用は、`hbsinit.cl` の中の`_iqucalc` の設定を、コメントに従って 2 に変更することにより、可能です。測光夜モードは、通常モードに比べ、常光と異常光とでの像の違い (PSF、フォーカス、ゆがみ等) の影響を受けないため、原理的にはより正確な値を求めることができますが、実際の観測においては、空の変動や、コメットダイヤフラム上での星像位置のズレによって光量が変動する影響の方が支配的であるため、一般にはデフォルトの設定のまま、通常モードを使用することを推奨します。

「2 方位モード」は、観測データの$\lambda/2$ 波長板方位角が 2 方位しかない場合 (例えば、0.0 度、22.5 度のみ) に、強制的に用いられます。

(a) 通常モード

$$a_1 = \sqrt{\frac{Sp_{ext}(0.0^\circ)}{Sp_{ord}(0.0^\circ)} \times \frac{Sp_{ord}(45.0^\circ)}{Sp_{ext}(45.0^\circ)}}$$

$$a_2 = \sqrt{\frac{Sp_{ext}(22.5^\circ)}{Sp_{ord}(22.5^\circ)} \times \frac{Sp_{ord}(67.5^\circ)}{Sp_{ext}(67.5^\circ)}}$$

$$q' = \left(\frac{Q}{I}\right)' = \frac{(1.0 - a_1)}{(1.0 + a_1)}$$

$$u' = \left(\frac{U}{I}\right)' = \frac{(1.0 - a_2)}{(1.0 + a_2)}$$

上式中の$'$ (ダッシュ) は、器械系のストークスパラメーターであることを示しています。精度は落ちますが $(error \sim 1\%)$ が、以下の I値も計算しています。

$$I = Sp_{ext}(0.0^\circ) + Sp_{ord}(0.0^\circ) * \kappa(0.0^\circ)$$

ここで、$\kappa(0.0^\circ) = k_{ext}(0.0^\circ)/k_{ord}(0.0^\circ)$ は、無変光標準星 $(q,\ u \sim 0)$ を利用した観測で、あらかじめ求めておきます。この Iの量的な評価については、上記精度と計算法をふまえ、扱いには注意してください。

(b) 測光夜モード

$$I = \frac{Sp_{ext}(0.0^\circ) + Sp_{ext}(45.0^\circ) + Sp_{ext}(22.5^\circ) + Sp_{ext}(67.5^\circ)}{2}$$

$$q' = \left(\frac{Q}{I}\right)' = \frac{1}{2}\left(\frac{Sp_{ext}(0.0^\circ) - Sp_{ext}(45.0^\circ)}{Sp_{ext}(0.0^\circ) + Sp_{ext}(45.0^\circ)} + \frac{Sp_{ord}(0.0^\circ) - Sp_{ord}(45.0^\circ)}{Sp_{ord}(0.0^\circ) + Sp_{ord}(45.0^\circ)}\right)$$

$$u' = \left(\frac{U}{I}\right)' = \frac{1}{2}\left(\frac{Sp_{ext}(22.5^\circ) - Sp_{ext}(67.5^\circ)}{Sp_{ext}(22.5^\circ) + Sp_{ext}(67.5^\circ)} + \frac{Sp_{ord}(22.5^\circ) - Sp_{ord}(67.5^\circ)}{Sp_{ord}(22.5^\circ) + Sp_{ord}(67.5^\circ)}\right)$$

(c) 2 方位モード

κを利用して、次のように求めます。他のモードに比べ、近いイメージサイズでのスペクトルが得にくいことと、グレーティングにおける常光と異常光との反射率の違いの波長依存性が大きいことにより、精度が落ちますが $(error \sim 0.5\%$。3.3.1を参照して下さい)、適当なビンニング等で、$0.2 - 0.3\%$ 程度まで小さくすることができます。

$$I = Sp_{ext}(0.0^\circ) + Sp_{ord}(0.0^\circ) * \kappa(0.0^\circ)$$

$$q' = \left(\frac{Q}{I}\right)' = \frac{Sp_{ext}(0.0^\circ) - Sp_{ord}(0.0^\circ) * \kappa(0.0^\circ)}{Sp_{ext}(0.0^\circ) + Sp_{ord}(0.0^\circ) * \kappa(0.0^\circ)}$$

$$u' = \left(\frac{U}{I}\right)' = \frac{Sp_{ext}(22.5^\circ) - Sp_{ord}(22.5^\circ) * \kappa(22.5^\circ)}{Sp_{ext}(22.5^\circ) + Sp_{ord}(22.5^\circ) * \kappa(22.5^\circ)}$$

これらは、この時点で得られているスペクトル $Sp_{ext}(\theta),\ Sp_{ord}(\theta)$ が、式 3.18, 3.19 のように表され、不必要な係数である $k_{ext},\ k_{ord}$や、$\xi(n)$ を有効に消すためにとっている方法です。ここで、$k_{ext},\ k_{ord}$ は異常光、常光それぞれでの透過 / 反射の効率をあらわし、$\xi(n)$ は、スカイコンディションの時間変動 (フレーム間での違い) を表す係数です。

さて、式の評価のところでも述べましたが、充分な光子数、フレーム数がある場合で、且つデータセットに用いられた$\lambda/2$ 波長板の方位角が 4 方位ある場合には、この計算によって、$< 0.1\%$ 誤差で、$(Q/I)',\ (U/I)'$を求めることができます。実際の経験でも、これはほぼ達成できていると考えています。

ただし、2 方位モードの整約による精度ですが、実際に星のスペクトルによって得られる κは、スペクトルのエナジー分布や、シーイングサイズ、ガイドエラーの違いも含んでいるため、波長を合わせてもそれだけでは補正できない誤差を生じ、注意が必要です。この誤差は、場合によって $(Q/I)',\ (U/I)'$ および Iに対し、peak-to-peak 値で 0.5%程度、数十Å 幅のギザギ模様となって効いてくることが多く、適当なビンニングによって、ある程度は軽減させることが可能ですが、0.2–0.3% の系統差が残る場合があります。よって、2 方位モードの整約を行う場合には、あらかじめ、この程度の誤差はみこんでおいて下さい。なお、2 方位モードでの系統誤差を少しでも減らす目的のため、κを、通常の UP 星 (F-K 型) で求めたものと、M 型の星で求めたものの 2 通りを較正データに入れてあります。どちらのκを用いるのかは、ＩＱＵグルーピングの際に尋ねられますので、近いと思われるほうのκを用いられることをお薦めします。

17. グループ内平均 (hbsiquave.cl)
ひとつのグループ内に同様の画像がいくつもある場合、3σ リジェクションを行いながら、I, q, u のフレーム間平均を行います。ビンニングしない場合、1 ピクセルごとに見ると、もともとＳ / Ｎが悪いために悪いデータが有効にはじかれない場合があるため、ここではカウントがそれなりにあると考えられる波長域全体のカウントの常光 / 異常光の比を用いて画像単位のリジェクションを行った後に、ピクセルごとのリジェクションを行います。複数のグループ間にまたがった平均も可能です。なお、最終結果が出力される画像ファイル名の根幹部を、各グループごとに hbsparam にて前もって指定してもらいます。

18. 消偏光、偏光方位角補正 (hbsmktable.cl , hbsiqupt.c)

(a) ＵＰ星[1] データによる原点補正

$$q(\lambda) = q'(\lambda) - q'_{\rm UP}(\lambda)$$

$$u(\lambda) = u'(\lambda) - u'_{\rm UP}(\lambda)$$

(b) ＧＴ[2]挿入データによる消偏光補正

$$P(\lambda) = P'(\lambda)/P'_{\rm GT}(\lambda)$$

(c) ＧＴ挿入データによる半波長板透過軸の波長依存性補正

$$\theta''(\lambda) = \theta'(\lambda) - \theta'_{\rm GT}(\lambda)$$

(d) ＳＰ星[3] データによる天球上の偏光方位角との合わせ

$$\theta(\lambda) = \theta''(\lambda) + |\theta''_{\rm SP}(\lambda)|$$

ＧＴプリズムを通した較正観測、強偏光標準星の較正観測の補正を行います。「equatorial」を選ぶと、ＧＴ補正、ＳＰ補正の行われた赤道座標系でのテーブル (拡張子 0.xy) が、「instrumental」を選ぶと、補正なしの器械系のテーブル (拡張子 tmp1) が出力されます。出力されるものは、λ、I, $q(\lambda)$, $\sigma_q(\lambda)$, $u(\lambda)$, $\sigma_u(\lambda)$, $P(\lambda)$, $\sigma_P(\lambda)$, $\theta(\lambda)$, $\sigma_\theta(\lambda)$ が 1 行に並んだものになります。さらに、「equatorial」の場合には、グラフ作りの利便のため、binning した / しないにかかわらず、拡張子 1.xy という、binning なしの λ、Iのみのテーブルも出力されます。

λは Å 単位の波長です。ビンニングした場合は、単純な中心波長で、カウントによるの重み付けは行なっていません。Iは異常光における光量で、単位は ADU です。$\lambda/2$

[1]無偏光標準星 (unpolarized standard)
[2]グラン ・テーラー ・プリズム。10^{-5}精度で完全直線偏光を実現する
[3]強偏光標準星 (strong polarized standard)

波長板方位角が 0 度と 45 度のものを足し合わせたカウントの、グループ内平均です。$q,\ u$ は、グループ内平均時に求められたストークスパラメーターのペア間平均値画像を数字に変換しただけのものです。$\sigma_q,\ \sigma_u$の計算法は次のようなものを採用しています。まず、$\lambda/2$ 波長板の方位角を ψ として、

$$\kappa_{obj}(\psi) = \frac{Sp_{ext}(\psi)}{Sp_{ord}(\psi)}$$

とおくと、

$$\begin{aligned} a_1 &= \sqrt{\frac{\kappa_{obj}(0.0^\circ)}{\kappa_{obj}(45.0^\circ)}} \\ a_2 &= \sqrt{\frac{\kappa_{obj}(22.5^\circ)}{\kappa_{obj}(67.5^\circ)}} \\ q' &= \frac{Q}{I} = \frac{a_1 - 1}{a_1 + 1} \\ u' &= \frac{U}{I} = \frac{a_2 - 1}{a_2 + 1} \end{aligned}$$

となりますので、誤差伝搬の公式から、

$$\begin{aligned} \sigma_q^2 &\approx \left[\frac{\mathrm{d}q'}{\mathrm{d}\kappa_{obj}(0.0^\circ)}\right]^2 \sigma^2_{\kappa_{obj}(0.0^\circ)} + \left[\frac{\mathrm{d}q'}{\mathrm{d}\kappa_{obj}(45.0^\circ)}\right]^2 \sigma^2_{\kappa_{obj}(45.0^\circ)} \\ &= \frac{a_1^2}{(a_1+1)^4}\left[\frac{\sigma_{\kappa^2_{obj}(0.0^\circ)}}{\kappa^2_{obj}(0.0^\circ)} + \frac{\sigma_{\kappa^2_{obj}(45.0^\circ)}}{\kappa^2_{obj}(45.0^\circ)}\right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_u^2 &\approx \left[\frac{\mathrm{d}u'}{\mathrm{d}\kappa_{obj}(22.5^\circ)}\right]^2 \sigma^2_{\kappa_{obj}(22.5^\circ)} + \left[\frac{\mathrm{d}u'}{\mathrm{d}\kappa_{obj}(67.5^\circ)}\right]^2 \sigma^2_{\kappa_{obj}(67.5^\circ)} \\ &= \frac{a_1^2}{(a_1+1)^4}\left[\frac{\sigma^2_{\kappa_{obj}(22.5^\circ)}}{\kappa^2_{obj}(22.5^\circ)} + \frac{\sigma^2_{\kappa_{obj}(67.5^\circ)}}{\kappa^2_{obj}(67.5^\circ)}\right] \end{aligned}$$

となります。つまり、各ψごとの、$\kappa_{obj}(\psi)$ の標準偏差である、$\sigma_{\kappa_{obj}(\psi)}$ をあらかじめ計算しておくと、上式によって、$\sigma_q,\ \sigma_u$が計算できます。

多くの場合、観測誤差には標準偏差σではなく、平均値の決定精度 ϵ

$$\epsilon_{obj}(\psi) = \frac{\kappa_{obj}(\psi)}{\sqrt{n}}$$

を用いるため、この整約ソフトウェアはデフォルトで、以後、ϵ を扱うようになっています。(`hbsinit.cl` の `_fg_err` にて設定 :次章参照)

偏光度 P と 偏光角の誤差は、

$$P(\lambda) = \sqrt{q^2 + u^2}$$

$$\theta(\lambda) = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{u}{q}\right)$$

の定義式をもとに、誤差伝搬の公式からつぎのようにして求められます。

$$\epsilon_P(\lambda) = \sqrt{\left(\frac{q}{p}\right)^2 \epsilon_q^2 + \left(\frac{u}{p}\right)^2 \epsilon_u^2}$$

$$\epsilon_\theta(\lambda) = \frac{1}{2P}\sqrt{\left(\frac{u}{p}\right)^2 \epsilon_q^2 + \left(\frac{q}{p}\right)^2 \epsilon_u^2}$$

なお、各グループ内で平均に用いた全フレームの統計 (平均観測時刻、平均エアマス、Q/I, I/U ごとの平均に用いられたフレーム数など) が、HBS.ave.log に出力されます。

4.4 処理パラメーター指定 (hbsparam)

各グループの、ビンニングに関する情報 (hbsbin にて使用)、スペクトルの波長依存性に関する情報 (hbsiqumake にて使用)、およびフレーム間の平均化の際に用いられるパラメーター (hbsiqulist --- hbsiquave にて使用) を、このプロセスを起動することで一度に指定できます。

一連の処理の中で、この hbsparam は hbsgroup の最後に自動的に起動されますが、途中で設定を変更したくなった場合 (ビンニングのやり方を別のものにしたい時、等)、いつでも起動できますので、対応プロセスを実行する前に、マニュアルで
cl> hbsparam [ENTER] と打ち込んで起動して下さい。

4.5 較正データの内容

4.5.1 共通較正データ

このディレクトリには、観測期に関係なくすべてのデータに共通に用いられる較正データが入っています。なお、このディレクトリ名はデフォルトでは etc ですが、適当な名前に変更できます。その場合、hbsinit.cl 内の_etcdir の設定を正しく変更しておきましょう。

1. HBS.feature.*
   これらは、hbsarrange.cl 実行時に参照される、2 つのスペクトルフィーチャーのデータが書かれています。2 つ使うのは、1 個だけだと同定ミスがありうるためで、2 つ使えばそのずれから同定の正確さがある程度判断ができます。

   このデータは各フレームの正確な波長同定のために非常に大事なものです。デフォルトでは、フィーチャーレスな天体用の HBS.feature.TIccd(TI5A CCD の波長感度特性)、およびバルマー輝線の強い天体用の HBS.feature.E-bal の 2 種類が用意されています。特殊なスペクトル型の場合には、観測者が独自に作る必要があります。

HBS.feature. で始まる適当なファイルに以下の内容を書いて、etc ディレクトリに入れておきましょう。

このファイルには、次のようなデータが 2 行書かれています。

```
e 4861.34 50.0 H-beta
```

最初のコラムの e は emission であることを示していて、absorption の場合には a と書きます。次の数字はフィーチャーの中心波長 (Å) です。3 つめのコラムは、フィーチャーのおおよその幅をかきます。この幅は、シーイングサイズかスリットダイヤフラムの幅で決まることがほとんどであり、最低でも 50Å 程度にしておいた方が良いと思いますが、その辺は個人でいろいろ試して決めていただいて結構です。4 つ目のコラムはコメント文です。1 行目が 1 番目、2 行目が 2 番目のフィーチャーのものになります。

2. Hg-Ne.dat
   このファイルの中には、ＨＢＳの比較光源である、hollow cathode tube の輝線データが並んでいます。フォーマットは、1 コラム目が波長 (Å) で、2 コラム目がコメントです。ただし、これは較正データを作製するときに使うもので、通常の観測データの整約では用いることはありません。

3. badcol_TI.dat, badpix_TI.dat
   これらのファイルの中には、ＨＢＳで使われている CCD の bad column および bad pixel のデータが並んでいます。データのフォーマットは、bad pixel/column に指定する矩形領域の左下と右上のピクセル座標をそれぞれ $(x1, y1)$, $(x2, y2)$ とすると、$x1$ $x2$ $y1$ $y2$ のように並んでいます。

4. null.dat
   中身が空のファイルです。IRAF に慣れている方でしたら、hbsarrange.cl で呼び出している identify などの表記を見てみると、どのように使われているかがわかると思います。

4.5.2 各観測期の較正データ

各観測期ごとの較正データは、あるひとつのディレクトリに格納されています。我々ＨＢＳグループで配布するものは、「観測期の始まりの年月」プラス「cal」で、例えば 9712cal となっています。どのディレクトリの較正データを参照するのかは、hbsinit.cl 内の_caldir の設定で行います。この辺は、初期設定の節を参照してください。

1. FLAT.***.pxs.imh
   ピクセル感度ムラ補正用のフラットフィールド画像です。***は、ダイヤフラムの種類を表します。円形 2 つ穴ダイヤフラム (通称 2 つ穴ダイヤフラム) なら 2HL、0.2mm 幅スリットダイヤフラム (通称 コメットダイヤフラム) なら、2S2 です。現在のところ、このフラットフィールドには、第 1 フラットを、それ自身の 5×5 走査平均したもので

割ったものをもちいています。1 ピクセルあたりに 0.5 %精度でこのフラットが必要ならば、およそ 24 万 ADU が必要となりますが、カウントの少ない領域 ($> 8000\AA$) でこれを達成するには、スカイフレームがおよそ 80 枚必要となります。

2. FLAT.***.1t?.-.imh
スカイ差引きのためのフラットフィールド画像で、第 1 フラットと呼んでいます。***は、ダイヤフラムの種類を表します。?は、波長板の方位角をあらわす整数で、その方位角をϕとすると、$\phi/22.5$ となっています。

現在のところ、第 1 フラットには、オブジェクトと同じ条件で昼のスカイを撮影したもの (ただし減光フィルターを入れるところと積分時間とが異なる) を用いています。これは、2 つの穴 (コメットダイヤフラムの場合は 2 つのスロット) の違い (大きさや形) をなくし、近傍スカイとして同じ条件で差し引くためのものです。これには、夜のスカイと昼のスカイが両方とも波長に対してなだらかなスペクトル分布をしていることが仮定です。この仮定が崩れるのは、夜の sky emission に対してですが、10 等級よりも明るい天体では、emission の輝度が低く、問題ありません。また、ダイヤフラムの径 (幅) の違いは 1 ピクセル程度であるので、暗い天体でも、シーイングサイズを考慮にいれると、このエラーをリアルなものと間違える可能性は低く、ノイジーなものと判断されるはずですが、このような観測を行う場合には、この点に留意して、丁寧に整約を行ってください。

3. FLAT.***.2t?.-.imh
ダイヤフラム内の y 方向のケラレ補正ためのフラットフィールド画像で、第 2 フラットと呼んでいます。***は、ダイヤフラムの種類を表します。?は、波長板の方位角をあらわす整数で、その方位角をϕとすると、$\phi/22.5$ となっています。

現在のところ、このフラットには、次のようなものを用いています。2 つ穴ダイヤフラムには、分光器スリットを通常のシーイングサイズと同程度の 0.3mm にして撮影した昼スカイのデータに対し、4 本のスペクトルに対しておのおの、Y 方向に 2 次の多項式をフィッティングして、Y 方向にゆるやかな依存性を示す成分を取り出したもので、さらにどの波長でもダイヤフラム中央のピクセルが 1 となるようにスケーリングしたものです。コメットダイヤフラムでは、第 1 フラットに対して、同様の処理をしたものになります。

これにより、ダイヤフラム内の y 方向のケラレは補正されます。この偏光測定は、(オートガイドの精度 $\sigma < 1\mathrm{arcsec} \sim 4\mathrm{pixels}$ で) ほぼ同一の場所で撮った相対測定であるので、x 方向のケラレは実質的に影響しません。

4. KAP.***.$t?.imh
無偏光標準星のスペクトルデータを使用して作成した、$\kappa(\lambda) = Sp_{ext}(\lambda)/Sp_{ord}(\lambda)$ のスペクトルです。***には、ダイヤフラムの種類を表す 3 文字が、$ には上下を表す 1 文字が入ります。これは、ストークス ・パラメーターを計算する際の通常モードにおいて、Iを求めるために使用するほか、１９９６年度の観測データの整約 (2 方位

モード) でも用いられます。実際の $\kappa(\lambda)$ は、特にグレーティングの影響で波長依存性がかなりきつい波長域があるため、波長合わせを注意深く行わないと、精度が得られません。また、2 方位モードの整約による精度ですが、実際に星のスペクトルによって得られる κは、スペクトルのエナジー分布や、シーイングサイズ、ガイドエラーの違いも含んでいるため、波長を合わせてもそれだけでは補正できない誤差を生じるため、注意が必要です。なお、このうちエナジー分布での違いによる系統誤差を少しでも減らす目的のため、1997 年度以前の較正データについては.red という拡張子を付した、赤色天体用のκ画像も添付されていて、整約プログラムでマニュアルで指定して使われるようになっています。

5. SENS.---.imh
   CCD に特有の波長感度特性曲線を表す画像です。---は、CCD の名称をあらわす文字が入ります。(ただし、９７年度の較正データではまだ正確に測定していないため、どの波長でもカウント$=1$ ADU の画像になっています) 整約プログラムによって生成される、ビンニングなしの $I(\lambda)$ のテーブル (*1.xy) は、この感度特性が補正されたものになっています。

6. f1to1??.tbl
   １対１対応のデータが並んでいるファイルです。

   f1to1we.tbl, f1to1wo.tbl は、波長方向 (ファイル名中の w は wavelength の頭文字) のゆがみを 5 次の多項式でフィッティングした 6 つの係数が記されています。前者が異常光、後者が常光用のファイルになります。これは、0.04mm 幅の long slit diaphragm をもちいて、適当な星を選び、上穴から下穴にむかって等間隔に 21 箇所で撮影したフレームを使っています。よって、それぞれのファイルには 21 行のデータが含まれています。ちなみに、この等間隔移動は、オートガイド用カメラである ST-4 のステージを 3 秒角ずつ移動させることで実現しています。たとえば、異常光の一本目の曲線と、常光の一本目は、もともとダイヤフラム上の同じ位置を通過した光であり、完全に重なる (対応している) ものである、ということができます。

   f1to1se.tbl, f1to1so.tbl は、スリット長方向 (ファイル名中の s は slit の頭文字) のゆがみを 3 次の多項式でフィッティングした 4 つの係数が記されています。前者が異常光、後者が常光用のファイルになります。これは、0.04mm 幅の long slit diaphragm をもちいて、比較光源を撮影し、その中から観測波長域を充分カバーする 25 本の輝線の位置を使っています。この際、常光と異常光を分離するために、ポラロイドシートを用いて撮影しています。よって、それぞれのファイルには 25 行のデータが含まれています。f1to1sw.tbl には、このテーブルを作製するために用いた 25 本の輝線の波長が記されています。

7. hbsdefine.h
   C 言語で記述されたプログラムのコンパイル時、変数の配列の定義にどうしても必要であるデータが記述されています。そのため、通常のプログラムで判別可能な数で

あったり、独立な数ではないものなどもあり、一見無駄なように思える設定もあるかもしれません。たとえば、ある数と別の数との差であらわされるものもあります。プログラムを解読して、こんな頭の悪いプログラムではダメ、こういう良い方法があるよという情報があれば、遠慮なく、ぜひぜひ紹介してください。

このファイルのフォーマットは、C 言語におけるもっとも単純な種類のマクロコールに基づいています。たとえば、
`#define XXX YYY /* ?????  */`
と書かれていれば、単純にいうと XXX に YYY を代入せよ、という意味で /*と*/に挟まれた部分はコメント文です。

NX0，NY0 ：もともとの画像のピクセルフォーマット

X1，Y1，X2，Y2 ：トリミングする矩形領域の左下の座標と右下の座標

NX1，NY1 ：トリミング後の画像のピクセルフォーマット

SW，EW，DW ：それぞれ、波長較正後の、左はじのピクセルの波長、右はじのピクセルの波長、1 ピクセルあたりの波長幅　(Å 単位)

SW，EW，DW ：それぞれ、1 対 1 対応変換後の画像の、左はじのピクセルの波長、右はじのピクセルの波長、1 ピクセルあたりの波長幅　(Å 単位)

NX2，NY2 ：1 対 1 対応変換後の画像のピクセルフォーマット

DY1_2HL，DY1_2HL ：1 対 1 対応変換後の画像で、2 つ穴ダイヤフラムの上穴、下穴の位置を表すピクセル座標

DY1_2S2，DY1_2S2 ：コメットダイヤフラムでの同上の座標

NY2a ：スペクトル 1 次元化の際に、y 方向に積分する最大ピクセル幅　(ver 2.0 では、この幅がまさに積分するピクセル幅になっており、どの波長でも同一)。

8. upcor.***$，upcor.***$
無偏光標準星の観測データの $Q/I,\ U/I$のテーブルです。観測期ごとに多数の観測を平均したものに対し、2 次多項式をフィッティングさせて、S / N を悪化させないものを用いています。これは、観測データのストークス ・パラメーターの原点として hbsiqupt の、equatorial モードの中で使われます。現 HBS では、観測期、波長域によって若干異なりますが、$Q/I,\ U/I$ともに $0.02 \sim -0.1\%$ 程度の値をもっています。

9. gtcor.***$，gtcoru.***$
グランテーラープリズムを挿入して観測した器械系テーブルの観測期平均です。*** には、ダイヤフラムの種類を表す 3 文字が、$ には上下を表す 1 文字が入ります。グランテーラープリズムを通過した光は、観測波長域において 10^{-5}の精度で、偏光角のそろった完全直線偏光になります。これを利用して、$\lambda/2$ 波長板の等価光学軸の波長依存性と、器械消偏光の補正を行ないます。

10. spave.***$, spave.***$
    強偏光標準星の観測データの、V バンドにおける器械系偏光角と、カタログ値との差になります。これをもとに、器械系から赤道座標系への偏光角の変換を行ないます。このデータは、HBS で標準星として用いている星のデータから観測期ごとに平均を算出した値を用いていますが、観測数が多くない場合、用いたダイヤフラムの種類によって系統的な差が現われないよう、代表的な標準星のデータをどの観測期でも系統的に使用するようにしています。その天体の情報は、各観測期の較正データに “spave.log” として記録しています。

4.6 画像変換後のヘッダー情報

cryocam ソフトが排出する FITS ファイルのヘッダーに含まれる情報で、その後のデータ解析に必要な情報は、積分時間、撮影開始、ゲイン、オフセット値、および CCD 温度しかなく、これだけではデータ整約の自動化はとうてい望めません。

整約プロセス内での画像変換時には、FITS ファイル (拡張子 fit) のヘッダーに、天文学的、および観測的な情報を加えられます。このヘッダーの内容は、基本的には 「日本国内 FITS ヘッダー統一項目案」(FITS 国内委員会、天文情報処理研究会) に基づいており、これに偏光観測で必要な項目を加味したものになっています。ここでは、整約時にいろいろと役にたつと思われる項目だけ紹介します。ちなみに、IRAF の cl 上で、ある画像ファイル “aho.fit” のヘッダー一覧を見るコマンドは、

```
cl> imheader aho.fit long+
```

です。

- OBJECT, HBSTITLE
  cryolist.dat で指定した、オブジェクト名です。IRAF の imheader コマンドでは、OBJECT の項目は表示されないので、同じものを HBSTITLE として書いています。(正確にいうと、IRAF 形式の画像では OBJECT の内容は、画像のピクセルフォーマットなどと同様に特別な形式で保存されており、imheader long+でもその内容が最初の行に表示されています)

- DATA-TYP
  cryolist.dat で指定した、各フレームのデータタイプです。OBJECT, DARK, BIAS, POLARIZER などがあります。

- RA, DEC, EQUINOX
  天体の赤道座標とその分点で、object.lst に書かれていたものになります。ちなみに、これ以外に必ず RA2000, DEC2000 という、西暦 2000 年分点に換算した座標の項目も作られ、比較に便利です。ただし、これはよく用いられる以下のような簡単な 2 次式を用いた換算であるため、どこまで精度があるのかは ?です。ここで、$(\alpha,\ \delta)$ は、西暦 t_{old}年分点の天体の赤道座標をあらわし、$(\alpha_{2000},\ \delta_{2000})$ は、西暦 2000 年分

点換算の座標を表しています。

$$
\begin{aligned}
t &= 2000 - t_{old} \\
d_1 &= 0.000223426676 + 0.000001354812t + 5.82 \cdot 10^{-10} t^2 \\
d_2 &= 0.00009718987143 - 0.0000004136915 + 1.794 \cdot 10^{-9} t^2 \\
\alpha_{2000} &= (d_1 + d_2 \sin\alpha \tan\delta) \cdot t \\
\delta_{2000} &= d_2 \cos\delta \cdot t
\end{aligned}
$$

- JD
  観測中央の世界時 (UT) のユリウス日で、小数点以下 5 桁まで書かれています。

- DATE-OBS
  世界時での観測日で、DD/MM/YY という順に書かれています。2000 年以降のデータは、FITS の国際標準として呼びかけられている YYYY-MM-DD というフォーマットになる予定です。

- UT, JST, LST
  それぞれ観測中央の、世界時、日本標準時、恒星時です。

- ZD
  天頂距離が角度単位で書かれています。

- AIRMASS
  エアマス ($f(Z)$) の値で、よく用いられる sec(ZD) の 3 次多項式をもちいて求めたものです。

- EXPTIME
  積分時間で秒単位になります。

- FILTER
  cryolist.dat で指定した、フィルターの名前が書かれています。

- DIAPHRAG
  cryolist.dat で指定した、ダイヤフラムの種類が書かれます。

第 5 章 5

整約ソフトウェアの実行

本章では、本ソフトを用いての観測データの整約方法を具体例を示しながら解説してゆきます。実際には細かい設定などもありますが、本章に沿って整約を進めてゆくだけで、最終的に各自の天文学ができる段階までの整約済データが得られるはずです。

5.1 初期設定の確認

5.1.1 login.cl

まずは、IRAF の設定の確認です。自分のホームディレクトリ (~/)、もしくはホームディレクトリ中にある~/$iraf$/にある $login.cl$ というファイルを探して、その中を覗いて見てください。

```
------------------------------------------------------------------
# LOGIN.CL -- User login file for the IRAF command language.

# Identify login.cl version (checked in images.cl).
if (defpar ("logver"))
logver = "IRAF V2.10EXPORT April 1992 revision 1"

set home = "/home/ikeda/iraf/"
set imdir = HDR $
set uparm = "home $uparm/"
set userid = "ikeda"

# Set the terminal type.
if (envget("TERM") == "sun")
..............
------------------------------------------------------------------
```

中身は上記のようになっているはずです。そのうち、$set \quad home$ という項と、$set \quad userid$ という項を確認します。$home$ は、$login.cl$ が収められているディレクトリです。$userid$ は、本人の ID-name です。もし、異なっている場合は書き換えを行ってください。

5.1.2 キャリブレーションデータの確認

整約を行うには、キャリブレーションデータが必要です。既に配布済みのキャリブレーションデータすべてを、一つのディレクトリ（例えば$/work/9712cal/$）に展開しておいてください。また、そのキャリブレーションデータが観測データと同時期のものであるかどうかを必ず確認してください。

5.1.3 観測データの確認

続いて、今から整約しようとする観測データをあるディレクトリ（=作業ディレクトリ）に展開します（例えば、/work/971225a/）。同じ日に観測したデータは、天体や観測モードが異なっても本ソフトでは同時に整約を行うことができるので、ディスク容量が許せば同日観測のファイルをすべて作業ディレクトリに収めておいても構いません。観測データは、fts の拡張子が付いています。さらに、作業ディレクトリには観測所で作成したその日の $cryolist.dat$ と $object.lst$ のファイルも収めておきます。

* 補足 "cryolist.dat" と"object.lst"

Cryocam(CCD 操作用ソフト) によって作成される FITS ファイルには、例えば波長板の角度など偏光子系のステータスの情報が書きこまれていません。従って、その不足分のヘッダ情報をテーブル化して書き込んであるのが $cryolist.dat$ と $object.lst$ です。これらファイルは、野帖を見ながら観測者自ら作成してもらわなければなりません。以下にそのフォーマットを解説します。

- cryolist.dat
  特に重要なのはこちらのファイルで、偏光子系のステータス、イメージの種類（ダーク、オブジェクトなど）が書き込まれています。ファイルの中身は以下のようになっています。

```
-------------------------------------------------------------
# SEEING 3.0
# WEATHER fair
# OBSERVER IKEDA
DA013116.fts S10001 4 0.0 6 2.00 2 0
DA013117.fts S10001 2 0.0 6 2.00 2 0
DA013118.fts S10001 1 0.0 6 2.00 2 0
DA013119.fts S10001 1 22.5 6 2.00 2 0
DA013120.fts S10001 1 45.0 6 2.00 2 0
```

```
DA013121.fts S10001 1 67.5 6 2.00 2 0
DA013122.fts S10001 1 0.0 6 2.00 2 0
.....................................
-------------------------------------------------------------
```

1. 第一ライン
   その日 (時刻) のおおよそのシーイングを秒単位で書いてください。
2. 第二ライン
   その日の天気です。$CLEAR$、$FAIR$、$HAZY$、$CLOUDY$の中から選んでください。
3. 第三ライン
   観測者名を記入してください。
4. 第四ライン以降
   各イメージファイル毎のステータスをテーブル式に書き込んでゆきます。以下に各カラムの説明をします。
   (a) 第一カラム
   ファイル名です。これは、観測時につけたものと同じ名前を使用します。
   (b) 第二カラム
   観測オブジェクト名です。ダークやバイアスのイメージを撮った場合でも、$DARK$や$BIAS$と書かずに、その時観測していたオブジェクト名を書くようにしてください (例えば上図では、第四ラインのファイルは実際にはバイアスフレームである (第三カラムにより分かる。以下参照) が、第二カラムには $S10001$ と書いてあります)。
   (c) 第三カラム
   フレームの種類を数字によって表します。各数字の意味は以下の通りです。
   0. Not use
   1. Object
   2. Dark
   3. Comparison
   4. Bias
   5. Day Sky
   6. Nearby sky
   (d) 第四カラム
   1/2 波長板の角度です。
   (e) 第五カラム
   使用したダイアフラムを数字によって表します。各数字の意味は以下の通りです。

1. 1 hole(使用しません)
2. 2 holes lower
3. 2 hole upper
4. comet 0.1mm lower(使用しません)
5. comet 0.1mm upper(使用しません)
6. comet 0.2mm lower
7. comet 0.2mm upper
8. comet 0.04mm(使用しません)

(f) 第六カラム
分光器スリットの幅です。ミリ単位で書きます (小数点第 2 桁まで書いてください)。普段の撮影では 2.00mm 以外で撮影することはありません。

(g) 第七カラム
望遠鏡の東西を表します。Telescope-West なら"1"、Telescope-East なら"2" と書きます。

(h) 第八カラム
フィルターを使用した場合、そのフィルター名を書き込みます。ただし、何も使用しなかった場合は"0"、グランテーラープリズムを使用した場合は"1" と書き込んでください。

- object.lst
観測した天体すべての名前、赤径、赤緯と分点を以下のようなフォーマットで書き込みます。

```
-------------------------------------------------------------
S10001          2000.0 01 20 05 +58 13 54
TX-CVn          2000.0 12 42 42 +36 45 49
-------------------------------------------------------------
```

1. 第一カラム
観測天体名を書き込みます。$cryolist.dat$ に書き込んだものと同じ名前にしてください。

2. 第二カラム
以下に記す観測天体の座標の分点を書きます。

3. 第三、四、五カラム
観測天体の赤経座標を、時、分、秒の順でそれぞれ 2 桁の整数で書き込みます。

4. 第六、七、八カラム
観測天体の赤緯座標を、度、分、秒の順でそれぞれ 2 桁の整数で書き込みます。赤経の符号 (+ or −) は必ず書くようにしてください。

現時点のシステムでは、観測時のファイルの同時作成は不可能な状態です。手動でのファイルの作成は非常に面倒な作業ですが、観測者自らが責任を持って随時作成するようにしてください。ただ、まだ未完成ながら両ファイル作成用の便利なツール（京都大 ・増田氏が開発）があります。まだ未完成であるため公開は致しませんが、使用したい方は開発グループのメンバーに声をかけてください。

5.1.4 hbsinit.cl の設定

自分のホームディレクトリ中の$\tilde{}/iraf/clscript/$の中に、$hbsinit.cl$ というファイルがあります。まず、このファイルを作業ディレクトリ（本例では、/work/971225a/）にコピーします。その中身を覗いてみましょう。

```
------------------------------------------------------------------
#
# HBS REDUCTION SUB ROUTINE
#
# initialization of global variables :  hbsinit.cl
#
# 1998/03/05 K.Kawabata Ver.1.00
# 1998/04/20 K.Kawabata Ver.2.00 unification
#

#-----------------------------------#
# #
# User Definitions #
# #
#-----------------------------------#

#--- Directory Setting

# Directory of C-program Definition Header File
set _defhdir = "/work/ikeda/9712cal/"
# Directory of 2hole-Diaph.  calib files set _caldir = "/work/ikeda/9712cal/"
# Directory of CL-scripts
set _clscript = "/home/ikeda/iraf/clscript/"
# Directory of C-programs
set _progdir = "/home/ikeda/iraf/prog/"
# Directory of miscellaneous
set _etcdir = "/home/ikeda/iraf/etc/"

#--- Run-time mode, Data Storage, etc.
```

```
# Display processing commands?
set _fg_ver = "1" # 1:verbose, 2:little display
# If found old images which will be made next, Replace or Skip?
set _fg_mode = "3" # 1:replace, 2:skip, 3:query
# Delete the images of last process ?  (Valid before 'hbsextract')
set _fg_del1 = "1" # 1:erase old images, 2:keep
# Delete the images of last process ?  (Valid at and after 'hbsextract')
set _fg_del2 = "2" # 1:erase old images, 2:keep (hbsskysub-hbs1d)
# Dark Averaging Mode
set _fg_dark = "1" # 1:group, 2:object, 3:exposure time
# Query at Bad pixel correction
set _fg_badpix = "2" # 1:query, 2:no query
# q/u calculation mode for 2HOLE diaphragm
set _iqucalc = "1" # 1:variable sky, 2:clear and stable sky
# Error Estimation
set _fg_err = ``1'' # 1:mean error (sigma/sqrt(n)), 2:standard deviation
# Reduction Mode
set _objcal = ``1'' # 1:  object obs.  2:  UP,SP,GT obs.  .....................
-----------------------------------------------------------------
```

- Directory Setting
  キャリブレーションデータのディレクトリと、ソフト実行時に起動する C プログラム、テーブルなどのディレクトリを指定しなければなりません。以下に従って書き換えを行います。

  1. Directory of C-program Definition Header File
     C プログラム用のヘッダーファイルの収められてあるディレクトリを指定します。ヘッダーファイルはキャリブレーションデータと同じディレクトリに収められてあります。
  2. Directory of 2hole-Diaph. calib files
     キャリブレーションデータが収められてあるディレクトリを指定します。
  3. Directory of CL-scripts
     IRAF 実行用のプログラムである CL-script が収められてあるディレクトリを指定します。通常は、自分のホームディレクトリ[1](上記では$/home/ikeda/$) の分だけを書き換えるだけで大丈夫です。
  4. Directory of C-programs
     C プログラムが収められてあるディレクトリです。これも、ホームディレクトリ

[1]ワークステーションにログインした時点で自分のいるディレクトリ

だけの書き換えを行うだけで結構です。

5. Directory of miscellaneous
   ソフトの起動に必要なその他のファイルが収められているディレクトリです。ホームディレクトリのみを書き換えてください。

- Run-time mode, Data Storage, etc.
  ソフト実行時の細かいモード設定です。必要に応じて書き換えを行ってください。

  1. Display processing commands?
     ソフトが行っている作業内容をディスプレイに表示するかどうかを選べます。表示させたい場合は"1"を、表示させたくない場合は"2"を選びます。
  2. If found old images which will be made next, Replace or Skip?
     同じ名前の古いファイルが同ディレクトリ内に存在した場合どうするかを決めます。"1"を選べば、上書きせずにスキップします。その場合新しいファイルは生成されまん。"2"を選べば、常に新しいファイルを上書きをします。"3"を選べば、ソフトの実行中そのたび毎に上書きするか否かを選択するモードになります。特に支障がなければ"3"を選ぶ方が無難です。
  3. Delete the images of last process ? (Valid before 'hbsextract')
     実行プロセス $hbsextract$(本プロセスの内容については 4.3 節を参照) 以前に生成された途中生成ファイルをディレクトリ内に残しておくかどうかを選びます。途中生成ファイルを消す場合は"1"を、残しておく場合は"2"を選びます。
  4. Delete the images of last process ? (Valid at and after 'hbsextract')
     $hbsextract$ 以後のプロセスでの途中生成ファイル (詳しくは 4.3 節を参照) を残しておくかどうかを選びます。選択方法は、3 と同様です。
  5. Dark Averaging Mode
     ダークフレームを作成する時に使用するフレームの種類を決めます。"1"を選べば、 同じ天体の、同じダイアフラムの、同じ積分時間の」フレームだけでダークフレームを作成します。"2"を選べば 同じ天体の、同じ積分時間の」フレームが使用ます。ダイアフラムの違いは無視されます。"3"を選べば、同じ積分時間のものがあれば、天体、ダイアフラムに関係なくそれらをすべて用いてダークフレームを作成します。
  6. Query at Bad pixel correction
     プロセス $hbsbadpix$ で、プロセスが正しく実行されたかを確認するために画像を見るかどうかを選びます。"1"を選べば確認するモードになります。しかし、通常は"2"(確認しない) のモードを選んでおいて問題ありません。
  7. q/u calculation mode for 2HOLE diaphragm
     デフォルトの整約法 (=通常モード) では、各波長について Q/I 及び U/I の値の

みが排出されます。しかし、2 つ穴ダイアフラムモードでしかも空が非常に安定したもとでの観測データからは、I、Q、U値を独立に求めることが可能です (= 測光モード)。通常モードの整約を行いたい場合は"1"を、測光モードでの整約を行いたい場合は"2"を選びます。

8. Error Estimation
観測誤差の導出法を選択します。‘‘1’’ を選んだ場合には、mean error とも呼ばれる 「平均値の決定精度」が採用されます。配布版ではこちらの設定になっています。また、‘‘2’’ を選んだ場合には、フレーム間の標準偏差が採用されます。おおざっぱに言って、‘‘1’’ で出力される値は、‘‘2’’ で出力される値の $(0.5 \times \sqrt{\text{全フレーム数}})$ 倍になっています。

9. Reduction Mode
整約モードを指定しますが、ユーザーが通常整約する場合にはデフォルト値’’1’’ から変更することは無いと思われます。‘‘2’’ は較正データ整約用に用意したもので、このモードにすると、グルーピングの際に、観測日が異なる場合に別グループに分けられるほか、整約パラメーター指定時に、出力ファイルの名前が 「オブジェクト名の頭文字を組み合わせたもの」と 「観測日時」を繋ぎ合わせた名前になります。

5.2 ソフトの実行

5.2.1 IRAF の起動

初期設定が終了したら早速データの整約を行いましょう。本ソフトウェアを実行する前に、IRAF を起動させなければなりません。まず、$login.cl$があるディレクトリ (~/もしくは ~/$iraf$/) に移行します。そこで、

cl Enter

とすれば以下のような表示が現れます。

```
------------------------------------------------------------------
NOAO SUN/IRAF Revision 2.10.4-p1 Wed Aug 30 20:58:43 MST 1995
This is the EXPORT version of Sun/IRAF V2.10.4 for SunOS-4.1.

Welcome to IRAF. To list the available commands, type ?  or ??.  To get
detailed information about a command, type ‘help command’.  To run a
command or load a package, type its name.  Type ‘bye’ to exit a
package, or ‘logout’ to get out of the CL. Type ‘news’ to find out
what is new in the version of the system you are using.  The following
commands or packages are currently defined:

dataio.  images.  lists.  obsolete.  proto.  system.
```

```
dbms.  language.  noao.  plot.  softools.  utilities.

cl>
------------------------------------------------------------
```

これで起動は完了です。

5.2.2 hbsinit

IRAF の起動が終了したら、ここでやっと作業ディレクトリに移ります。これ以降は作業ディレクトリから出ることはありません。

$$cl> \quad cd \quad /work/ikeda/971227a/ \quad \boxed{\text{Enter}}$$

そこで *hbsinit* を実行します。

$$cl> \quad hbsinit \quad \boxed{\text{Enter}}$$

hbsinit では、C プログラムのコンパイル、パスの設定などを一度に行います。

5.2.3 hbsred

さていよいよ、整約の開始です。ここでは *hbsred* のコマンドを用います。

$$cl> \quad hbsred \quad \boxed{\text{Enter}}$$

そうすると、以下の表示が現れます。

```
------------------------------------------------------------
(RET):New Reduction (1):Customize >>
------------------------------------------------------------
```

ここで、整約のモードを選択します。一つは、オートマチックモードで必要なすべてのプロセスを順に自動的に最後まで行ってくれます。もうひとつは、カスタマイズモードで行いたいプロセスを自分で選ぶことができます。

- オートマチックモード
  $[RET] : New Reduction[1] : Customize >>$の表示が出ている段階で Enter を押します。そうするだけで、2 番目のプロセスである *hbsgroup* と、10 番目の *hbsarrange* 以外は、全く手を触れずに整約を進めることができます。

  2 番目のプロセスである *hbsgroup* の終了時に、*hbsparam* が起動され、

  ```
  --- OBJECT LIST : HBS.OBJ.U00209.1 ---
  Binning mode [RET]:org [1]:const error [2]:sum [3]:mean [4]:def.file >>
  ------------------------------------------------------------
  ```

  のような表示があらわれます。全くビンニングをする必要がなければ、そのまま Enter

を押してこのプロセスをスッキプすることができます。1 Enterとすれば、電子統計エラーが一定になるように波長の短い方から可変幅にてビンニングしてゆきモードに突入し、以下のように表示されます。

```
-----------------------------------------------------------------
> [1]:  Constant error [2]:  Use same bin-table as others >>
-----------------------------------------------------------------
```

そのグループのカウントでビンニング幅を決定したければ、‘‘1’’ を選択し、別のグループのビンニング (’’1’’ で作成されたテーブル) と同じビンニングにしたい場合 (あるオブジェクトの比較星のグループなどで利用されることを想定) に指定します。‘‘1’’ を選択すると、

```
-----------------------------------------------------------------
Constant error setting in percent [0.01-1.0] >>
-----------------------------------------------------------------
```

と表示されますので、指定したい誤差をパーセント単位で入力して下さい。オブジェクトの明るさや、指定する精度にもよりますが、0.02--0.05 あたりが目安になると思います。‘‘2’’ を選択した場合には、グループ一覧が表示されますので、同じビンニングにしたいグループ番号を指定してやります。当然のことながら、その対象となるグループでは、他のグループ参照を参照する以外のいずれかの方法で、ビンニングの仕方を決定しておく必要があります。

2 Enterとすれば、全ての波長域について同じ幅でビンニングを行うモードに突入し、以下のようにビンニング幅の入力を促してきます。

```
-----------------------------------------------------------------
Binning factor in angstrom (> 5.305) >>
-----------------------------------------------------------------
```

ここで、必要なビンニング幅の値をÅ 単位で入力し、Enterとします。ただし、CCD の 1 ピクセルの幅 (5.305 Å) 以下でのビンニングは行えません。

3 Enterとすれば、和ではなく、走査平均をとるモードに入ります。単純ビンニングモードの時と同様に走査平均をとるピクセル幅を入力して、Enterとします。ただし、このモードでは、各ピクセルの中心波長は変わらず、全ピクセル数ももとのまま保存されることに注意して下さい。

波長域によってビンニングや走査平均の幅を細かく指定したい場合には、4 Enterとします。しかし、このモードを選ぶ場合はどの波長域でいくつの幅のビンニングを行うかを指定するファイルをあらかじめ作成しておく必要があります。以下に、そのファイルのフォーマットを紹介します。

```
-----------------------------------------------------------------
3800.0000 10.00000
3825.0000 50.00000
3845.0000 40.00000
3895.0000 100.0000
```

```
3920.0000 50.00000
3922.5000 5.000000
3932.5000 20.00000
3937.5000 10.00000
.........................
```

---

1 カラム目にビンニングの中心波長、2 カラム目にビンニング幅を入力します。ファイル名を $HBS.bintab.$ ではじまる名前 (例えば $HBS.bintab.Balmer$) にして、$\tilde{}/iraf/etc/$ に収めておいてください。2 のモードを選んだ際に、作成したファイルの一覧が番号とともに表示されますので、番号で該当するファイルを指定して下さい。

ビンニングの指定を終えると、今度はそのグループの天体のスペクトル型を指定します。これは、スペクトル型によるκの波長依存性の違い (PSF が、$kappa$ の波長依存性を無視できるほど狭くも広くもなく、同程度であることに起因) をなるべく補正するために指定します。この設定は、14 番目のプロセス $hbsiqulist$ と、15 番目のプロセス $hbsiqumake$ で参照されます。現在の推奨観測モードである $0.0°$-$67.5°$を撮影したデータについては、インテンシティスペクトルを作成する際にのみκが参照されます。一方、$0.0°$と $22.5°$もしくは、$45.0°$と $67.5°$の組しか撮影されていない場合は、偏光スペクトルを求める際にもκが参照されます。 この指定は、

```
Select Sp type of HBS.OBJ.R_AQR.1 [1]:OBAFGK [2]:M >>
```

のように表示されたあと、観測天体のスペクトル型に対応する番号を入力することで行ないます。O 型から K 型の場合は 1 Enter、M 型の場合は 2 Enter とします。

次に、各グループにおける出力ファイルの根幹部名を入力します。

グループの選択が終わると、

```
Root-name of output table ([0]:  grouping again) >>
```

と表示されるので、ここで出力されるファイル名の先頭の文字を決定し、入力します (例えば $S10001h$ Enter) [2]。

ファイル名の入力が済むと、以下のような表示が現れます。

```
Clipping Sigma for S10001h >>
```

フレーム間の平均をとる際には、本プログラムでは n-σリジェクションを行っていま

[2]出力ファイル名は、MS-DOS パソコン上で操作することも考える場合には 7 文字におさえて下さい。最終的に 2 つの整約結果ファイルが出力されますが、それらはここで指定した名前に、2 つを区別する文字 (0 と 1) が付け加えられ、拡張子が .xy となります

すが、ここではリジェクションの閾値を決めます。例えば、3-σリジェクションを行いたい場合は、3 Enter と入力します。以上で、hbsgroup および hbsparam の指定は終了です。その後は自動的に処理が流れていくはずです。

10 番目のプロセスである *hbsarrange* に入ると、

```
------------------------------------------------------------
28-May-98-22:09:02 10 hbsarrange

------------------------------
Shift and Arrange Wavelength
------------------------------

--- OBJECT LIST : HBS.OBJ.S10001.1 LOWER ---
da013170.  Select feature type [n]:normal [b]:Balmer em.  [u]:user def.
>>
------------------------------------------------------------
```

と、波長あわせのために使用するスペクトルフィーチャーを尋ねてきます。M 型星に代表される吸収帯が入りくんだような複雑なスペクトルフィーチャーをしていない限り、ノーマルモード ([n]) で問題無いので、ここではノーマルモードのみを解説します。(ノーマルモードでうまく行かない場合は、ユーザーモードを使用することになります。64 ページの 「補足」を参照してください。)

n Enter

と入力すると、

```
------------------------------------------------------------
Mark with 'm' near emission feature at X=366 of 75 width
------------------------------------------------------------
```

という表示とともに、63 ページの図 5.1 のようなウィンドウが出現します。図の A 辺りにカーソルをあわせ、m キーを押します。

```
------------------------------------------------------------
367.10 367.10474 ( 367.10474 ):
------------------------------------------------------------
```

のような表示がでるのでそこで、Enter 、qの順にキーを押します。再び、

```
------------------------------------------------------------
Mark with 'm' near absorption feature at X=722 of 18 width
------------------------------------------------------------
```

といった表示が現れるので、今度は B の辺りにカーソルを合わせ、m キーを押します。

```
------------------------------------------------------------
722.21 722.20807 ( 722.20807 ):
```

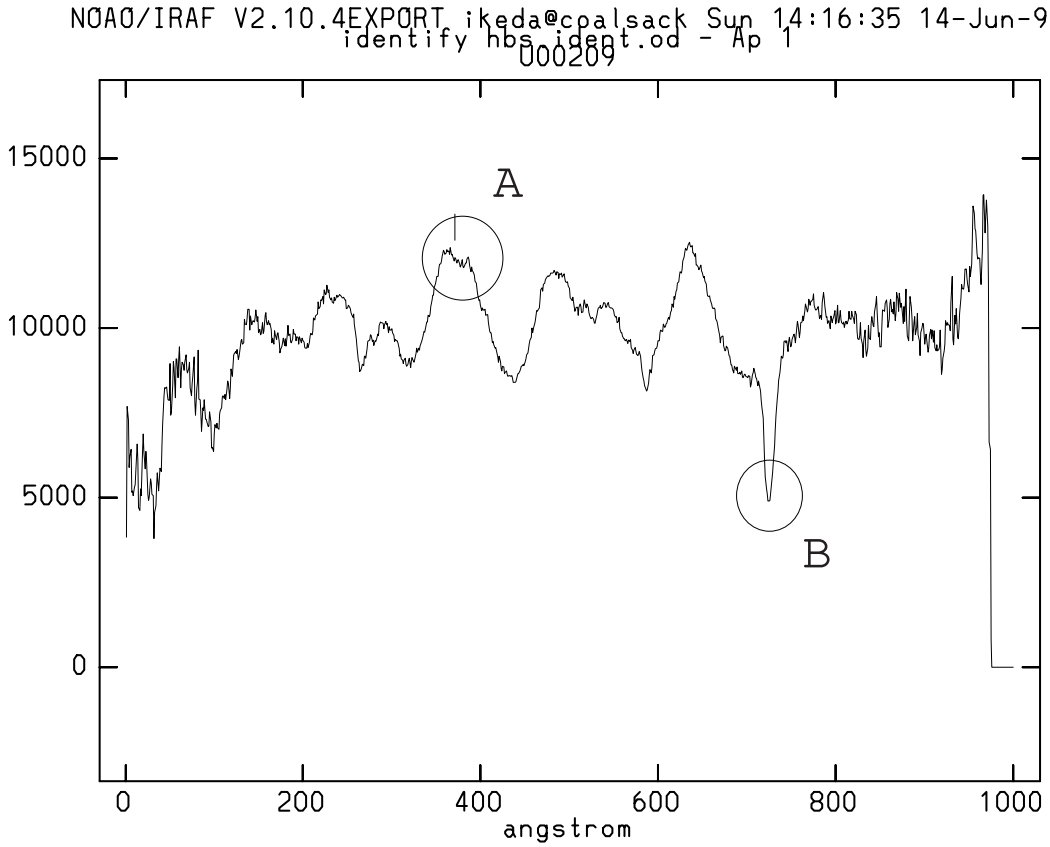


図 5.1: hbsarrange で表示される画面

というような表示が現れたらEnter、qの順にキーを押せばこのプロセスでの作業は終了です。あとは、選んだフィーチャーをもとに自動的に波長合わせを行ってくれます。プロセス終了後は自動的に次のプロセス $hbsflat1$ に移行し、13 番目のプロセス $hbsbin$ まで手を触れる必要はありません。

*補足 ユーザーモード

輝線や吸収線が多く、非常に複雑なスペクトルをしている天体に対しては、ノーマルモードではうまくフィーチャーを検知できず、波長較正がうまくいかない場合があります。こういう場合は、むしろ既知の輝線、または吸収線のフィーチャーを用いて波長合わせをした方が有利です。$hbsarrange$ の最初の画面で、[u] を選べばユーザーモードとしてノーマルモードと同様の手順で波長合わせを行えますが、その前にフィーチャーを指定するテーブルを個々に作成しなければなりません。ここでは、そのテーブルのフォーマットにつて解説します。

たとえば、ノーマルモードのテーブル（$\tilde{}/iraf/etc/HBS.feature.TIccd$）は以下のようになっています。

```
e 5737.90 400.0 TI-CCD-f1(e)
a 7624.05 100.0 TI-CCD-f2(a)
```

第一カラムがフィーチャーの種類（輝線 [e]or 吸収線 [a]）です。第二カラムがフィーチャーの中心波長（Å 単位）です。第三カラムはフィーチャーの典型的な幅（Å 単位）です。第四カラムはコメント文です。テーブルには、必ず 2 つのフィーチャーの情報を収めます。また、作成したテーブルは$HBS.feature.$という文字列ではじまるファイル名を付け、$\tilde{}/iraf/etc/$の中に収めておいてください。例えば、以下のようなテーブル（ファイル名は$\tilde{}/iraf/etc/HBS.feater.CygCH$）を作ることができます。

```
e 5006.8 100.0 [OIII]5007
e 6562.8 150.0 H-alpha
```

さらに詳しい内容に関しては、開発グループに相談してください。

その後、自動的に平均化が始まりまり、終了すると最初のグループを選んだ画面に戻ります。ここで、他のグループの平均も行いたければそのグループの番号を選び、あとは同様の手順を踏みます。次のプロセスに進みたければ、

0 Enter

とします。

続いては、最後のプロセス $hbsmktable$ です。以下のような表示が現れます。

```
------------------------------------------------------------
28-May-98-23:34:42 17 hbsmktable

-----------------------------------------------
make table of I, q, u, P, theta (instrumental)
-----------------------------------------------

Coordinate system [1]:equatorial [2]:instrumental >>
------------------------------------------------------------
```

2 種類のモードが選択できるようになっていますが、ここでは 1 のモードを選んでください (つまり、1 Enter としてください)。2 のモードは、器械系の値を吐き出すモードで通常は使いません。

最後のプロセスが終了すると、

```
------------------------------------------------------------
cl>
------------------------------------------------------------
```

とプロンプトが表示され、整約は終了です。作業ディレクトリ内を覗いてみましょう。一つのグループにつき$???????0.xy$及び$??????1.xy$ という名前の 2 つのファイルが生成されているはずです。前者は、ビンニングされた I、Q/I、U/I の波長に沿ったテーブル、後者はビンニング前の Iの波長に沿ったテーブルになっています。(テーブルの読み方は 4.3 節を参照)。以上で整約は終了です。あとは、これらを用いて各自の天文学を行ってください。

- カスタマイズモード

```
------------------------------------------------------------
(RET):New Reduction (1):Customize >>
------------------------------------------------------------
```

の表示が出ている段階で、1 を入力すると、カスタマイズモードに突入し、全プロセスの一覧が表示されます。

```
------------------------------------------------------------
[RET] :New Reduction [1] :Customize >> 1
1 hbsfconv
2 hbsgroup
3 hbsdarkave
4 hbsdarksub
5 hbstrim
6 hbsbadpix
7 hbspixsens
8 hbsextract
```

```
9 hbsskysub
10 hbsarrange
11 hbsflat2
12 hbs1d
13 hbsbin
14 hbsiqugroup
15 hbsiqumake
16 hbsiquave
17 hbsmktable

Beginning Proc-ID number >>
------------------------------------------------------------------
```

この中から好きなプロセスだけを選んで行うことができます。例えば、*hbstrim* から *hbspixsens* までのプロセスを行おうとすれば、まず

5 Enter

と入力します。

```
------------------------------------------------------------------
End Proc-ID number >>
------------------------------------------------------------------
```

の表示が現れますので、そこで

7 Enter

と入力すればプロセスが開始されます。プロセスが終了すると、

```
------------------------------------------------------------------


                HBSRED FINISHED. Let's enjoy astronomy.


cl>
------------------------------------------------------------------
```

と表示されプログラムが終了したことを知らせてくれます。

5.2.4 IRAF の終了

整約が終了したら、IRAF を終了しなければなりません。

cl > *logout* Enter

と入力すれば、IRAF を終了できます。

第 6 章 6

こんな時は

6.1 問い合わせ先など

Q : わからないことがあったとき、どこに問い合わせればよいのですか ?
A : 我々 HBS ソフト開発チームに問い合わせてください。E-mail address は

hbs@astr.tohoku.ac.jp

です。

Q : この解析ソフトがバージョンアップをしたとき、その情報はどうすれば入手できますか ?
A : ユーザーの皆様に、こまめに E-mail 等の伝達手段でお知らせするつもりです。また、堂平のホームページを開設し、このページに最新の情報を掲載する予定です。

6.2 ソフトについて

Q : iraf を起動したのに、ほとんどのコマンドを受け付けてくれません。
A : cl コマンドで iraf を起動したとき、マニュアル通りの起動画面ではなく、

```
Warning:  no login.cl found in login directory
     dataio     images     lists     obsolete     proto     system
     dbms     language     noao     plot     softools     utilities
cl>
```

という表示だった場合は、*login.cl* ファイルが存在しないディレクトリで cl コマンドを実行したと思われます。この場合、あなたが設定した *login.cl* ファイルを参照せずに iraf が起動していますので、我々の HBS 解析ソフトはうまく動きません。このような時は一度 iraf を終了し、*login.cl* があるディレクトリまで移動した後にもう一度 cl コマンドで iraf を起動し直してください (51 ページ 5.1.1 節参照)。

Q : hbsinit コマンドが動きません。

A : おそらく、*hbsinit.cl* ファイルを作業ディレクトリにコピーし忘れていることが原因か、作業ディレクトリで hbsinit コマンドを行わなかったことが原因だと考えられます。よって、作業ディレクトリに *hbsinit.cl* ファイルがあるかを確認のうえ、もう一度作業ディレクトリ上で hbsinit コマンドを使ってください (55 ページ 5.1.4 節参照)。

6.3 さらに上手に使うために

Q : iraf 上で、UNIX のコマンドを使いたいのですが …

A : 基本的には、iraf では非常に限られた UNIX のコマンドしか受け付けてくれません。このようなときには、以下の二つの方法があります。

1. *login.cl* を編集して、UNIX コマンドを登録する方法。

2. UNIX コマンドの前に、"!" マークをつける方法。

2. の方法は非常に単純で、使いたいコマンドの前に

```
cl> !more *.*
```

と "!" マークをつけることで、全ての UNIX コマンドが使用できます。ただ、毎回毎回 "!" を打つことは大変ですので、自分の *login.cl* ファイルを編集して、使用頻度の高い UNIX コマンドを登録することになります。*login.cl* ファイルを下に見ていくと、

```
package user

task $adb $bc $cal $cat $comm $cp $csh $date $dbx $df $diff = "$foreign"
task $du $find $finger $ftp $grep $lpq $lprm $ls $mail $make = "$foreign"
```

というような表示があります。このように左端に task と書き、その後に自分の用いたい UNIX コマンドに $ マークをつけ = "$foreign" でその行を終えることで、次の iraf 起動時から登録した UNIX コマンドが、iraf 上でも使えるようになります。

参考文献

[1] Serkowski, K. 1973, Polarization techniques. *Methods of experimental physics, Vol 12: Astrophysics, Part A.* (M. L. Meeks and N. P. Carleton, eds.) New York: Academic Press.

[2] Serkowski, K. 1974, Polarimeters for optical astronomy. *Planets, Stars and Nebulae studied with photopolarimetry* (T. Gehrels, ed.) The University of Arizona Press

[3] Buil, C. 1991, *CCD Astronomy, Construction and Use of an Astronomical CCD Camera*, Willmann-Bell, Inc.

[4] Bennett, J. M. and Bennett, H. E., 1978, in *"Handbook of Optics"* Walter G. Driscoll ed., McGrow-hill Book Campany, section 10.