

すばる望遠鏡高分散分光器 IRAFによる データ整約の手引

第 1.0 版
青木和光 (国立天文台)
2001 年 6 月

はじめに

すばる望遠鏡高分散分光器（HDS）のデータ整約ソフトウェアの整備の一環として、IRAFによるエシエルデータの整約方法について紹介します。第1章では、二次元のエシエルデータ（CCDデータ）から、各オーダについての、横軸：波長、縦軸：カウント数の形のスペクトルが得られるところまでの整約方法を説明します。これらの作業は、エシエル分光器で得られるデータをあつかう際には、ほとんど常に必要なものです。また、実際のデータ整約にあたっては、バッドピクセルや宇宙線のあたったピクセルの処理、得られたスペクトルのフラックス較正もしくは規格化、オーダをつないで1本のスペクトルにすること、等々が必要になります。これらは観測の目的によっては不必要であったり、やり方が何種類かあったりしますが、その例を第2章で「個別の課題」として紹介します。

以上のデータ処理は、HDSに限らず、エシエル分光器で得られるデータの処理一般に用いることができます。一方、HDSデータに特有の処理内容があります。それらについては、第3章で説明します。HDSデータの整約を始める場合には、まずこの第3章に書かれた処理を行ってから第1、2章のデータ整約に進むことになります。

ご存知のように、IRAFでは、データ処理をインタラクティブに行うことができます。説明の中で、必要に応じて処理の途中経過として現れる図や、指定するパラメータの例を示しています。

なお、今回用いたIRAFのバージョンは2.11.3です。

IRAFの基本的な使い方はここでは省きます。今回出てくるタスクは基本的にimredのechelleパッケージにあります。詳細については、以下のマニュアル（IRAFのホームページから取得可能）や、オンラインヘルプを参照して下さい。

D. Willmarth, J. Barnes, 1994

'A User's Guide to Reducing Echelle Spectra with IRAF'

Valdes 1992

'Guide to the Slit Spectra Reduction Task DOECSLIT'

この「手引」は、いろいろな方から指導をいただきながらも、筆者の経験にもとづいて書かれたものです。したがって、不十分なところが多いほか、筆者の思い違いや記述の誤りもあると思います。できるだけいろいろなデータについての整約の経験を反映し、充実させていこうと考えていますので、疑問点や問題と思われる点がありましたら、下記までお寄せ下さい。

2001年6月15日

青木和光

〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1 国立天文台

TEL: 0422-34-3531 FAX:0422-34-3545

E-mail: aoki.wako@nao.ac.jp

目次

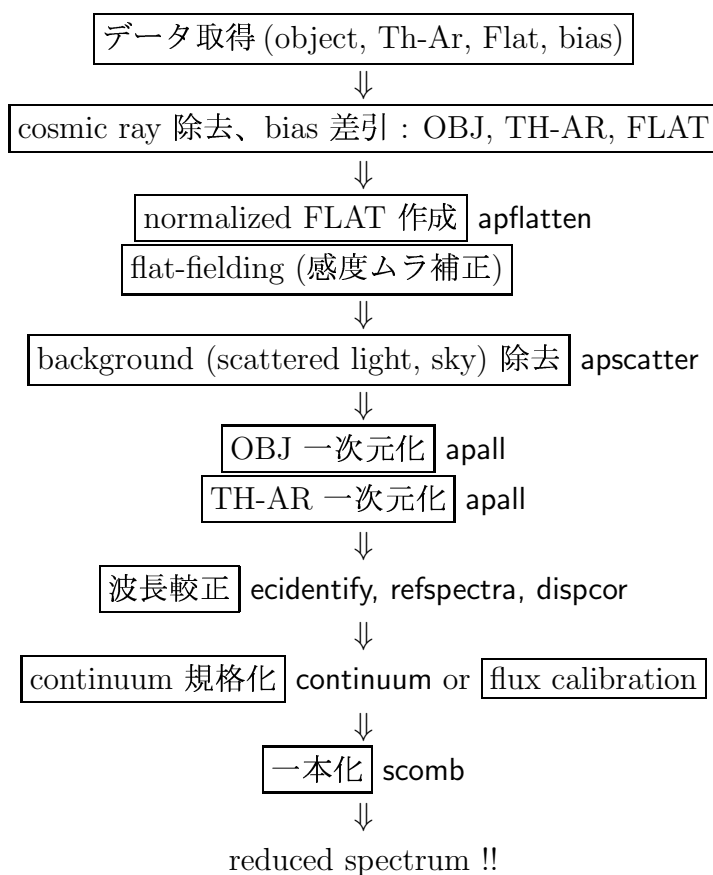
第 1 章 基本編：1 次元スペクトルを得るまで	5
1.1 データリダクションの概要	5
1.2 各フレームの準備	6
1.3 フラットフレームの規格化	6
1.4 フラットフレームで直接割る方法	8
1.5 バックグラウンド除去	8
1.6 一次元化	9
1.7 波長較正	9
1.8 パラメータの設定例	11
1.8.1 echelle	11
1.8.2 apdefault	11
1.8.3 apflatten	12
1.8.4 apfind	13
1.8.5 aprecenter	13
1.8.6 apresize	14
1.8.7 apedit	14
1.8.8 aptrace	15
1.8.9 imreplace	15
1.8.10 apscatter	16
1.8.11 apscat1, apscat2	16
1.8.12 apall	18
1.8.13 ecidentify	20
1.8.14 refspectra	20
1.8.15 dispacor	21
1.9 図	22
第 2 章 エシエルデータの処理：個別の課題	31
2.1 宇宙線ノイズの除去	31
2.1.1 同一天体を同一フォーマットで 3 フレーム以上撮ってあるとき	31
2.1.2 同一天体を同一フォーマットで 2 フレーム撮ってあるとき	32
2.1.3 フレーム 1 枚だけのとき	32
2.2 夜光の除去	34
2.3 スペクトルの規格化、フラックス較正	35

2.3.1	フラットフレームを用いたグレーティング特性の較正	35
2.3.2	天体スペクトルの規格化	35
2.3.3	フラックス較正	36
2.4	スペクトルの一本化	37
2.5	データ処理の自動化	38
2.6	パラメータの設定例	42
2.6.1	boxcar	42
2.6.2	standard	42
2.6.3	sensfunc	43
2.6.4	calibrate	43
2.7	図	44
第 3 章	HDS データの特色とその処理方法	49
3.1	HDS データの基本的な特徴	49
3.1.1	フレーム番号	49
3.1.2	FITS データの特徴	49
3.1.3	データ形式の特徴	49
3.2	HDS データに特有なデータ処理	50
3.2.1	アスキー拡張テーブルの処理	50
3.2.2	オーバースキャン領域の処理	50
3.3	FITS ヘッダ・テーブルの例	51
3.3.1	FITS ヘッダ	51
3.3.2	アスキー拡張テーブルのヘッダ	55
3.3.3	アスキー拡張テーブル	56

第1章 基本編：1次元スペクトルを得るまで

1.1 データリダクションの概要

以下にデータリダクションの概要を示す。本章では、「FLAT 作成」から「波長校正」までを取り扱い、結果としてエシエル各オーダごとに波長校正されたスペクトル（フラックス校正もしくは規格化はされていない）を得ることを目標とする。



エシエルデータの処理に特有な内容として、オーダごとに一次元化する際にスリット方向に足し合わせる範囲（アパーチャ）を決め、オーダトレースを行うという作業がある。この作業は、フラットフレーム（FLAT）の規格化、天体フレーム（OBJ）の背景光除去および一次元化、波長校正用データ（TH-AR）の一次元化のあわせて4回出てくる。しかしエシエルフォーマットが共通ならば、これらの作業は一度やっておけばあとはほぼ自動的に行うことができる。したがって、はじめにフラットフレームの規格化のところがうまくいくと、あとは比較的スムーズにいくと思われる。

1.2 各フレームの準備

データ整約に用いるデータを、以下のように準備しておく（ファイル名はもちろん任意）。

- bias ... 複数枚とってあるものの median をとる。⇒ BIAS
- flat ... 複数枚とってあるものからそれぞれ BIAS を差し引き、median をとる ⇒ FLAT
- comparison (Th-Ar 等) ... BIAS を差し引く ⇒ TH_AR
- object ... (cosmic ray を除去し、) BIAS を差し引く ⇒ OBJ

二次元画像の処理についてはここでは省略する。ここでは暗電流は無視した。スリット方向はピクセル並びに平行であると仮定する（すなわち、1次元化の際にスリット像の倒れを無視する）。

図 1.1 に星のデータの例を示す。図の縦がエシエルの分散方向、横がクロスディスパーザの分散方向（スリット方向）である。このイメージには約 33 オータ写っており、右下が短波長側、左上が長波長側である。中央にオーバースキャン領域があり、左右でバイアスレベルやゲインに違いがある。これらについては第 3 章で説明する。

このようなエシエルデータを扱う場合には、エシエルの分散方向とスリット方向が、X-Y(横-縦) 軸とどう対応するのか、指定してやる必要がある。これは echelle のパラメータ 'dispaxi' によって指定できる（1.8.1 参照）。このデータの場合、エシエルの分散方向が縦 (Y) 方向なので、dispaxi(s) は 2 に設定しておく。

また、このパッケージで用いるデフォルト値は、apdefault で指定する（1.8.2 参照）。

1.3 フラットフレームの規格化

概要： 一般に、OBJ から、ピクセル間の感度ムラの影響を取り除くため、FLAT フレームで割る必要があるが、エシエルデータの場合、直接 FLAT で割ると、オータ間の光の当たっていない部分で割られる部分が出てしまい、あとで背景光（散乱光もしくはスカイ）の除去が難しくなる。そこで、いちど FLAT についてオータトレースと一次元化を行い、グレーティングおよびフラット光源の特性による低次の成分（カウントの大局的な勾配）については全体の値が 1 になるよう規格化する。オータ間の値は 1 に固定する。こうして得られた フレームを 'FLAT_N' とすると、オータトレースに用いた部分については、ピクセル間の感度ムラのみが残ることになる。この FLAT_N で OBJ および TH_AR を割ることで、ピクセル間の感度ムラを補正することができる。

やり方： この作業に用いるタスクは、apflatten。

図 1.2 に、FLAT の column 方向（スリット方向）の断面図を示した。この範囲には 22 オータ写っていることがわかる。まず、オータトレースのために、切り出す部分（アパーチャ）を決定する。このとき、基本的なパラメータとして、'line' と 'nsum' がある。'line' は、アパーチャ探しとサイズの決定を行う場所（エシエル分散方向について）を指定するパラメータであるが、'INDEF' にしておけば中央（の line）を用いることになり、通常はこれでよい。また、'nsum' によって アパーチャ決定を行う line を取り出す際に用いる line の本数（ピクセル数）を指定する。HDS の場合、オータの傾きがわりと大きいいため、この値は大きめ（数十）にとるとアパーチャが決まりやすいようである。apflatten のパラメータの例を 1.8.3 に示した。

このタスクは、実際には以下のタスクにわけられる。それぞれ独立したタスクとしても存在しており、それぞれのパラメータを指定することができる。

- **apfind** : ある line でのアパーチャをさがす。パラメータの例を 1.8.4 に示した。
apfind のパラメータ 'nfind' でオーダ数を与えると、自動的にさがしてくれる。例えば、図 1.2 に示したデータでは、22 本のオーダが写っているので、そのように指定する。
その他、apfind のパラメータとして、'minsep' (オーダの間隔の最小), 'maxsep' (同最大) を指定できる。うまくアパーチャ探しができないときには、これらの指定を変えてみる。
※'order' は、長波長側/短波長側のどちら側からオーダ番号をつけていくかを定めるパラメータ。好みで決める。
※ フラットデータの場合、トレースが困難になるほどオーダ間が狭いことがある。この場合、トレース用にスリット長の短いフレーム (*short_quartz*) を撮っておき、それを用いて apfind のみ行っておく。そのうえで、apflatten の 'referen' パラメータに *short_quartz* を指定し、'find' パラメータは no にして apflatten を実行する。
- **aprecenter** : アパーチャの中心位置の変更。とくに、上記のように別のデータ (*short_quartz* など) によってアパーチャ探しをやった場合には重要。パラメータの例を 1.8.5 に示した。
- **apresize** : みつかったアパーチャのサイズの変更。パラメータの例を 1.8.6 に示した。
ulimit, llimit で、アパーチャの上下限 (ピクセル数) を指定しておくことができる。また、'ylevel' で、切り出すカウントの下限 (ピークとの比) を指定できる。'bkg' は no にしておく。'avglimits' を yes にすると、すべてのオーダについてのアパーチャ・サイズの平均を使用する。S/N が低い場合などに有効。問題なければ no でも構わない。
- **apedit** : インタラクティブにアパーチャの位置やサイズを変更する。apedit のパラメータ 'width', 'radius' を指定する。パラメータの例を 1.8.7 に示した。
図 1.2 には、上のほうに決定されたアパーチャとその番号が示されている。'd' や 'n' などを入力することで、アパーチャの変更が可能である (ヘルプ参照。ヘルプは '?' の入力で見られる) が、できるだけ自動的に決定できるようにパラメータを探したほうがよい。
- **aptrace** : 決定されたアパーチャによってオーダトレースを行う。パラメータの例を 1.8.8 に示した。
図 1.3 には、あるオーダについて、その中心をトレースしていった様子が示されている。縦、横軸とも単位はピクセル数。
トレースに用いる関数とその次数はあらかじめ指定するが、作業をインタラクティブにやると途中で変更可能である (ヘルプ参照)。パラメータ 'step' で、分散方向にどれだけの刻みでトレースしていくか指定する。オーダの傾きによっては、'step' が大き過ぎるとトレースが粗くなってしまいうし、小さ過ぎると強い吸収のあるところでオーダを見失うおそれがある。パラメータ 'niterat' を 1 以上にすると、そのあとの 'low_rej', 'high_re' で指定した値より外れたものをリジェクトし、フィットを繰り返す。(リジェクトされた点はダイヤ印で示されるが、この図の場合、たまたまそのような点はなかったようである)。
トレースができると、オーダー毎に一次元化されたフラットのスペクトルが得られる (図 1.4)。パラメータ 'flatten' を yes にしておくと、このスペクトルを用いてフラットフレームの規格化が行われる。規格化に用いる関数と次数を指定しておく (タスク実行中にインタラクティブに指定することもできる。ヘルプ参照)。図 1.4 には、点線である関数をフィットした様子が示されている。低次の成分 (主にエシェルグレーティングの特性による) がよくフィットされている様子

かる。そこからの細かなずれはピクセル間の感度ムラに起因するものであると考えられる。

得られた FLAT_N のスリット方向の断面を図 1.5 に示す。全体は規格化されて平らになり、そこに感度ムラがのっている。この検出器の場合は、2-3 パーセントのムラがあるようである。この FLAT_N で OBJ を割る ($\Rightarrow$ OBJ_F)。必要に応じて、同様に TH_AR も割る ($\Rightarrow$ TH_AR_F)。

1.4 フラットフレームで直接割る方法

この方法の利点：

フラットフレームを apflatten で規格化することなく、直接天体データを割ってしまっても、感度ムラは概ね補正できる。この処理方法は、単に作業が簡単であるだけでなく、いくつか利点がある。

ひとつは、バッドコラムの影響を受けにくいことである。天体の光がバッドコラムにかかってしまうと、その波長域については、正しいスペクトルを抽出するのは困難である。これに加えて、apflatten を実行すると、フラット光はスリット長いばいに写っているため、天体のフレームにくらべてもバッドコラムにかかってしまう割合が大きく、使えなくなってしまう波長域が広がってしまう。フラットフレームで直接割るなら、オーダ抽出作業を天体データについてのみ行えばよいので、天体の光がバッドコラムにかかった部分だけが影響を受けるだけですむので、バッドコラムが多数存在している場合には有効である。

また、フラットフレームを規格化しないため、割った後には、天体データではエシエルのブレースブローファイルの形がおおむね消えてしまう。これにより、その後の処理が容易になる場合がある。

方法：

フラットフレームは、通常数万カウントのデータであるため、これで割ってしまうと、天体データからはカウント (フラックス密度に対応) の情報が全く失われ、たいてい非常に小さい値のデータになってしまう。これをある程度改善するため、フラットの平均的なカウントで全体を割り、大雑把に規格化しておく。図 1.2 の例では、34,000 カウント程度で割っておく。

また、オーダ間のカウントは非常に小さく、天体のフレームをフラットフレームで割ると、オーダ間の値はおおきなバラツキをもってしまう。そこで、上で大雑把に規格化したフラットフレームを、ある閾値 (たとえば 0.1) 以下のカウントのピクセルは、すべてカウントを 1 に置き換えておく。この作業には、imreplace を用いる (1.8.9)。この処理を行ってえられたフラットフレームの例を図 1.6 に示す。これにより、實際上、オーダ間はフラット補正がなされないことになるが、この部分はいずれにしてもスペクトル抽出には使われないので、特に問題にはならない。

1.5 バックグラウンド除去

概要： OBJ_F を見ると、散乱光やスカイの光などがあるため、オーダ間のカウントは一般にゼロになっていない (図 1.7)。これをバックグラウンドとして除去する必要がある。これには、OBJ_F についてアパーチャを決め、マスクしてしまい、それ以外の部分を背景光と考えて曲面フィットして OBJ_F から差し引く ($\Rightarrow$ OBJ_FS)。TH_AR については、この作業は必要ない (だろう)。

やり方： タスクは apscatter。1.8.10 にパラメータの例を示した。apflatten のときと同様に、'apfind', 'aprecenter', 'apresize', 'apedit', 'aptrace' のパラメータ指定を (今度は OBJ_F に対して) 行う。'eparam

'apscatter' とやって、'apscat1' (または 'apscat2') のところで ':e' を入力すると、dispersion (または slit) 方向のフィッティングに用いる関数の指定ができる。タスクを実行すると、apflatten のときと同様に、OBJ_F のオーダトレースの作業を行い (図 1.8 には、OBJ_F についてアパーチャを決めている様子が示されている)、その後に、バックグラウンドに対して局面フィットした結果が、slit 方向について示される (図 1.9)。満足できたら 'q' で抜ける。別の line についてのフィットも見たいければ、'line 200' などと入力する。slit 方向について満足したら、'quit' とやると、今度は dispersion 方向のフィットが示される (図 1.10)。こちらは、'column 2500' などではいろいろな column についてフィットの様子を見ることができる。満足したら 'quit'。しばらくすると、バックグラウンドを差し引いた画像が得られる。

1.6 一次元化

概要: OBJ_FS のオーダトレースを行い、アパーチャ内のシグナルをスリット方向について足し合わせて一次元のスペクトルを得る ($\Rightarrow$ OBJ_FS.ec)。

やり方: タスクは apall。

まずは apflatten と同様に、OBJ_FS についてオーダトレースを行うが、その際のパラメータの大部分は apall のパラメータとして指定できる。apall のパラメータの例を 1.8.12 に示した。パラメータ 'extract' を yes にしておくと、自動的に一次元化される。アパーチャの指定が、'apscatter' と同じでよければ (背景光の影響が小さければ)、'referen' パラメータで OBJ_F を与えておくことで、トレースまでの作業は省略でき、インタラクティブにはすることは何もない。得られたプロファイルの例を図 2.1 に示す。この段階で、オーダごとに、横軸ピクセル数、縦軸カウントのスペクトルが得られることになる。

アパーチャのとりかた、トレースとも OBJ と全く同じパラメータで、TH_AR の一次元化を行う ($\Rightarrow$ TH_AR.ec)。この場合、apall のパラメータ 'input' には TH_AR_F、'referen' には OBJ_FS を入れる。

1.7 波長較正

概要: 波長較正は、TH_AR.ec に見られる輝線を、Th-Ar の波長と同定し、オーダ&ピクセル数と波長との関係式を導き、星のスペクトルに波長をはりつけるという手順で行う。なお、HDS を用いて取得された Th-Ar データをもとに作成されたアトラスが準備されており¹、Th-Ar 線の同定作業において有用である。

やり方:

- まず、splot で、オーダごとの TH_AR.ec の図 (ピクセル v.s. カウント) について、Th-Ar のアトラスと比較して輝線の波長を同定する。
- データのうえでの同定は、ecidentify で行う。このタスクのパラメータの例を 1.8.13 に示す。

このタスクをはしらせると、オーダごとに TH_AR.ec のスペクトルが現れる。同定したい輝線のところにカーソルをもって行って、'm' とやると、輝線の上に縦棒が現れるので、波長 (Å) を入力する。同定を取り消したいときには、その輝線のところで 'd' とやる。図 1.11 にこの作業の様子を示す。

¹ <http://www.naoj.org/Observing/Instruments/HDS/wavecal.html>

※'m'をやったときに、カーソルの位置が悪いとすぐ近くの別の輝線を認識してしまうので注意。また、輝線の形が悪い場合には認識しないこともある。

※パラメータ 'coordli' で Th-Ar のラインテーブルを与えておく（リストは IRAF の中にもあり、たいいていはデフォルトで入っているものを用いてよい）、波長は大雑把な値を入力するだけでラインテーブルから読んできてくれる。ただし誤って別のラインの波長を読んできていないか、注意が必要。

一つのオーダーで3-4本の輝線を同定したら、'k'を入力することで次のオーダーに進む。戻りたいときは 'j'、*n* 番めのオーダーに飛びたいときには 'o *n*'。

すべてのオーダー（もしくは一部のオーダー）についてこの作業を行ったら、'l'を入力すると、同定しなかった輝線についても、Th-Ar のラインテーブルを参照して自動的に同定してくれる。間違った同定をしていないかチェックする。

'f' とやると、同定されたラインについて、オーダー&ピクセル数と波長の関係式を導くためのフィッティングを行い、結果を表示してくれる（図 1.12）。'x' と 'y' によって、横軸と縦軸の表示内容を選択できる。例えば、オーダーと残差の関係を見るには、'x' のあとに 'o'、'y' のあとに 'r' を入力する。著しく外れた点は、同定ミスと判断して、'd' によって取り除く。フィッティングの関数と次数は ': function', ':xorder', ':yorder' で変更できるので、残差が小さく (0.1-0.2 ピクセル) なるように選択する（関数については、表 6-1 に示したパラメータ指定においても変更可能である）。ただし、あまり高い次数にすると、誤ったフィットでも残差が小さくなってしまうので注意が必要である。

満足したら 'q' でフィッティング作業を終了し、さらに 'q' で同定作業を終了する。

- refspectra で OBJ_FS.ec の波長校正のデータとして TH_AR.ec を指定する (1.8.14)。(複数の校正用データを用いることもできる。ヘルプを参照。)
- dispcor で実際の波長校正を行う (1.8.15)。これで、波長を割り付けられたスペクトルが得られる。splot などでも確認できる。

*

*

*

*

以上で一次元化されたスペクトルが得られる。結果は splot で、オーダー番号を指定することで見ることができる。

1.8 パラメータの設定例

1.8.1 echelle

```

                                I R A F
                                Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = imred
TASK = echelle

(extinct= onedstds$kpnoextinct.dat) Extinction file
(caldir = ) Standard star calibration directory
(observa= observatory) Observatory of data
(interp = poly5) Interpolation type
(dispxi= 2) Image axis for 2D/3D images
(nsum = 1) Number of lines/columns/bands to sum for 2D/3D i
(database= database) Database
(verbose= no) Verbose output?
(logfile= logfile) Text log file
(plotfil= ) Plot file
(records= ) Record number extensions
(version= ECHELLE V3: July 1991)
(mode = ql)
($nargs = 0)

```

1.8.2 apdefault

```

                                I R A F
                                Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = echelle
TASK = apdefault

(lower = INDEF) Lower aperture limit relative to center
(upper = INDEF) Upper aperture limit relative to center
(apidtab= ) Aperture ID table
(b_func= chebyshev) Background function
(b_order= 1) Background function order
(b_sampl= -10:-6,6:10) Background sample regions
(b_naver= -3) Background average or median
(b_niter= 0) 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
(mode = ql)

```

1.8.3 apflatten

I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = echelle
TASK = apflatten

```

input      =          FLAT  List of images to flatten
output     =          FLAT_N List of output flatten images
(apertur=   )          ) Apertures
(referen=   )          ) List of reference images

(interac=   yes)        yes) Run task interactively?
(find      =   yes)      yes) Find apertures?
(recente=   yes)        yes) Recenter apertures?
(resize    =   yes)      yes) Resize apertures?
(edit      =   yes)      yes) Edit apertures?
(trace     =   yes)      yes) Trace apertures?
(fittrac=   yes)        yes) Fit traced points interactively?
(flatten=   yes)        yes) Flatten spectra?
(fitspec=   yes)        yes) Fit normalization spectra interactively?

(line      =          INDEF) Dispersion line
(nsum      =          100) Number of dispersion lines to sum or median
(thresho=   10.)        10.) Threshold for flattening spectra

(pfit      =          fit1d) Profile fitting type (fit1d|fit2d)
(clean     =          no)  Detect and replace bad pixels?
(saturat=   INDEF)      INDEF) Saturation level
(readnoi=   0.)          0.) Read out noise sigma (photons)
(gain      =          1.)  Photon gain (photons/data number)
(lsigma    =          4.)  Lower rejection threshold
(usigma    =          4.)  Upper rejection threshold

(funcio=   spline3)     spline3) Fitting function for normalization spectra
(order    =          3)  Fitting function order
(sample   =          *)  Sample regions
(naverag=   1)          1) Average or median
(niterat=   5)          5) Number of rejection iterations
(low_rej=   3.)         3.) Lower rejection sigma
(high_re=   3.)         3.) High upper rejection sigma
(grow     =          0.)  Rejection growing radius
(mode     =          ql)

```

1.8.4 apfind

```

                                I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = echelle
TASK = apfind

input =                      List of input images
(apertur=                      ) Apertures
(referen=                      ) Reference images

(interac=                      no) Run task interactively?
(find =                        yes) Find apertures?
(recente=                      no) Recenter apertures?
(resize =                      no) Resize apertures?
(edit =                        yes) Edit apertures?

(line =                      INDEF) Dispersion line
(nsum =                      400) Number of dispersion lines to sum or median
nfind =                      0  Number of apertures to be found automatically
(minsep =                      40.) Minimum separation between spectra
(maxsep =                      150.) Maximum separation between spectra
(order =                      increasing) Order of apertures
(mode =                      ql)
```

1.8.5 aprecenter

```

                                I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = echelle
TASK = aprecenter

input =                      List of input images
(apertur=                      ) Apertures
(referen=                      ) Reference images

(interac=                      no) Run task interactively?
(find =                        yes) Find apertures?
(recente=                      yes) Recenter apertures?
(resize =                      no) Resize apertures?
(edit =                        yes) Edit apertures?

(line =                      INDEF) Dispersion line
(nsum =                      10) Number of dispersion lines to sum or median
(aprecen=                      ) Apertures for recentering calculation
(npeaks =                      INDEF) Select brightest peaks
(shift =                      yes) Use average shift instead of recentering?
(mode =                      ql)
```

1.8.6 apresize

I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = echelle
TASK = apresize

```

input      =      List of input images
(apertur=    ) Apertures
(referen=    ) Reference images

(interac=    no) Run task interactively?
(find  =    yes) Find apertures?
(recente=    no) Recenter apertures?
(resize =    yes) Resize apertures?
(edit  =    yes) Edit apertures?

(line  =      INDEF) Dispersion line
(nsum  =      3)  Number of dispersion lines to sum or median
(llimit =    -20.) Lower aperture limit relative to center
(ulimit =     20.) Upper aperture limit relative to center
(ylevel =    0.1) Fraction of peak or intensity for automatic w
(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?
(mode  =      ql)

```

1.8.7 apedit

I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = echelle
TASK = apedit

```

input      =      List of input images to edit
(apertur=    ) Apertures
(referen=    ) Reference images

(interac=    yes) Run task interactively?
(find  =    no) Find apertures?
(recente=    no) Recenter apertures?
(resize =    no) Resize apertures?
(edit  =    yes) Edit apertures?

(line  =      INDEF) Dispersion line
(nsum  =      10)  Number of dispersion lines to sum or median
(width =     30.) Profile centering width
(radius =     15.) Profile centering radius
(thresho=    0.)  Detection threshold for profile centering
(mode  =      ql)

```

1.8.8 aptrace

```

                                I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = echelle
TASK = aptrace

input =                               List of input images to trace
(apertur=                             ) Apertures
(referen=                             ) List of reference images
(interac=                             yes) Run task interactively?
(find =                               yes) Find apertures?
(recente=                             no) Recenter apertures?
(resize =                             no) Resize apertures?
(edit =                               no) Edit apertures?
(trace =                              yes) Trace apertures?
(fittrac=                             yes) Fit the traced points interactively?

(line =                               INDEF) Starting dispersion line
(nsum =                               20) Number of dispersion lines to sum
(step =                               3) Tracing step
(nlost =                              3) Number of consecutive times profile is lost befo
(function=                             legendre) Trace fitting function
(order =                              3) Trace fitting function order
(sample =                             *) Trace sample regions
(naverag=                             1) Trace average or median
(niterat=                             0) Trace rejection iterations
(low_rej=                             3.) Trace lower rejection sigma
(high_re=                             3.) Trace upper rejection sigma
(grow =                               0.) Trace rejection growing radius
(mode =                               ql)

```

1.8.9 imreplace

```

                                I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = imutil
TASK = imreplace

images =                             flatL_Bc0 Images to be edited
value =                              1. Replacement pixel value
(imagina=                             0.) Imaginary component for complex
(lower =                              INDEF) Lower limit of replacement window
(upper =                              0.1) Upper limit of replacement window
(radius =                              0.) Replacement radius
(mode =                               ql)

```

1.8.10 apscatter

```

                                I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = echelle
TASK = apscatter

input  =          OBJ_F List of input images to subtract scattered li
output =          OBJ_FS List of output corrected images
(apertur=          ) Apertures
(scatter=          ) List of scattered light images (optional)
(referen=          flatL_Bc) List of aperture reference images

(interac=          yes) Run task interactively?
(find  =          no) 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?
(subtrac=          yes) Subtract scattered light?
(smooth =          yes) Smooth scattered light along the dispersion?
(fitscat=          yes) Fit scattered light interactively?
(fitsmoos=         yes) Smooth the scattered light interactively?

(line  =          INDEF) Dispersion line
(nsum  =          20) Number of dispersion lines to sum or median
(buffer =          1.) Buffer distance from apertures
(apscat1=          ) Fitting parameters across the dispersion
(apscat2=          ) Fitting parameters along the dispersion
(mode  =          ql)

```

1.8.11 apscat1, apscat2

```

                                I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = echelle
TASK = apscat1

(functionio=        spline3) Fitting function
(order  =          3) Order of fitting function
(sample =          *) Sample points to use in fit
(naverag=          1) Number of points in sample averaging
(low_rej=          5.) Low rejection in sigma of fit
(high_re=          2.) High rejection in sigma of fit
(niterat=          5) Number of rejection iterations
(grow  =          0.) Rejection growing radius in pixels
(mode  =          ql)

```

```

                                I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = echelle
TASK = apscat2

(functionio=        spline3) Fitting function
(order  =          9) Order of fitting function
(sample =          *) Sample points to use in fit
(naverag=          1) Number of points in sample averaging
(low_rej=          3.) Low rejection in sigma of fit
(high_re=          3.) High rejection in sigma of fit
(niterat=          0) Number of rejection iterations
(grow  =          0.) Rejection growing radius in pixels

```

(mode = q1)

1.8.12 apall

I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = echelle
TASK = apall

```

input      =          OBJ_FS  List of input images
(output =    OBJ_FS.ec) List of output spectra
(apertur=    ) Apertures
(format =    echelle) Extracted spectra format
(referen=    OBJ_F) List of aperture reference images
(profile=    ) List of aperture profile images

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

(line     =    INDEF) Dispersion line
(nsum     =    20) Number of dispersion lines to sum or median
                # DEFAULT APERTURE PARAMETERS

(lower    =    INDEF) Lower aperture limit relative to center
(upper    =    INDEF) 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=    -10:-6,6:10) Background sample regions
(b_naver=    -3) Background average or median
(b_niter=    0) 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    =    15.) Profile centering width
(radius   =    30.) Profile centering radius
(thresho=    0.) Detection threshold for profile centering
                # AUTOMATIC FINDING AND ORDERING PARAMETERS

nfind     =    16 Number of apertures to be found automatically
(minsep    =    40.) Minimum separation between spectra
(maxsep    =    1000.) Maximum separation between spectra
(order     =    increasing) Order of apertures
                # RECENTERING PARAMETERS

(aprecen=    ) Apertures for recentering calculation
(npeaks    =    INDEF) Select brightest peaks
(shift     =    no) Use average shift instead of recentering?
                # RESIZING PARAMETERS

(llimit    =    -17.) Lower aperture limit relative to center

```

```

(ulimit =          17.) Upper aperture limit relative to center
(ylevel =          0.05) Fraction of peak or intensity for automatic w
(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 =           3)  Tracing step
(t_nlost=          10)  Number of consecutive times profile is lost b
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=           2)  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)

```

1.8.13 ecidentify

```

                                I R A F
                        Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = echelle
  TASK = ecidentify

images =          TH_AR.ec  Images containing features to be identified
(databas=          database) Database in which to record feature data
(coordli=  linelists$thar.dat) User coordinate list
(units =          ) Coordinate units
(match =          1.) Coordinate list matching limit in user units
(maxfeat=          100) Maximum number of features for automatic iden
(zwidth =          10.) Zoom graph width in user units
(ftype =          emission) Feature type
(fwidth =          5.) Feature width in pixels
(radius=          10.) Centering radius in pixels
(thresho=          10.) Feature threshold for centering
(minsep =          2.) Minimum pixel separation
(funcio=          chebyshev) Coordinate function
(xorder =          2) Order of coordinate function along dispersion
(yorder =          2) Order of coordinate function across dispersio
(niterat=          0) Rejection iterations
(lowreje=          3.) Lower rejection sigma
(highrej=          3.) Upper rejection sigma
(autowri=          no) Automatically write to database?
(graphic=          stdgraph) Graphics output device
(cursor =          ) Graphics cursor input
(mode =          ql)

```

1.8.14 refspectra

```

                                I R A F
                        Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = echelle
  TASK = refspectra

input =          OBJ_FS.ec  List of input spectra
(referen=          TH_AR.ec) List of reference spectra
(apertur=          ) Input aperture selection list
(refaps =          ) Reference aperture selection list
(ignorea=          yes) Ignore input and reference apertures?
(select =          interp) Selection method for reference spectra
(sort =          ) Sort key
(group =          ) Group key
(time =          no) Is sort key a time?
(timewra=          17.) Time wrap point for time sorting
(overrid=          no) Override previous assignments?
(confirm=          yes) Confirm reference spectrum assignments?
(assign =          yes) Assign the reference spectra to the input spe
(logfile=          STDOUT,logfile) List of logfiles
(verbose=          no) Verbose log output?
answer =          yes  Accept assignment?
(mode =          ql)

```

1.8.15 dispcor

```

                                I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = echelle
TASK = dispcor

input = OBJ_FS.ec List of input spectra
output = OBJ_FS.ecw List of output spectra
(lineari= yes) Linearize (interpolate) spectra?
(databas= database) Dispersion solution database
(table = ) Wavelength table for apertures
(w1 = INDEF) Starting wavelength
(w2 = INDEF) Ending wavelength
(dw = INDEF) Wavelength interval per pixel
(nw = INDEF) Number of output pixels
(log = no) Logarithmic wavelength scale?
(flux = no) Conserve flux?
(samedis= no) Same dispersion in all apertures?
(global = no) Apply global defaults?
(ignorea= no) Ignore apertures?
(confirm= no) Confirm dispersion coordinates?
(listonl= no) List the dispersion coordinates only?
(verbose= yes) Print linear dispersion assignments?
(logfile= ) Log file
(mode = ql)
```

1.9 図

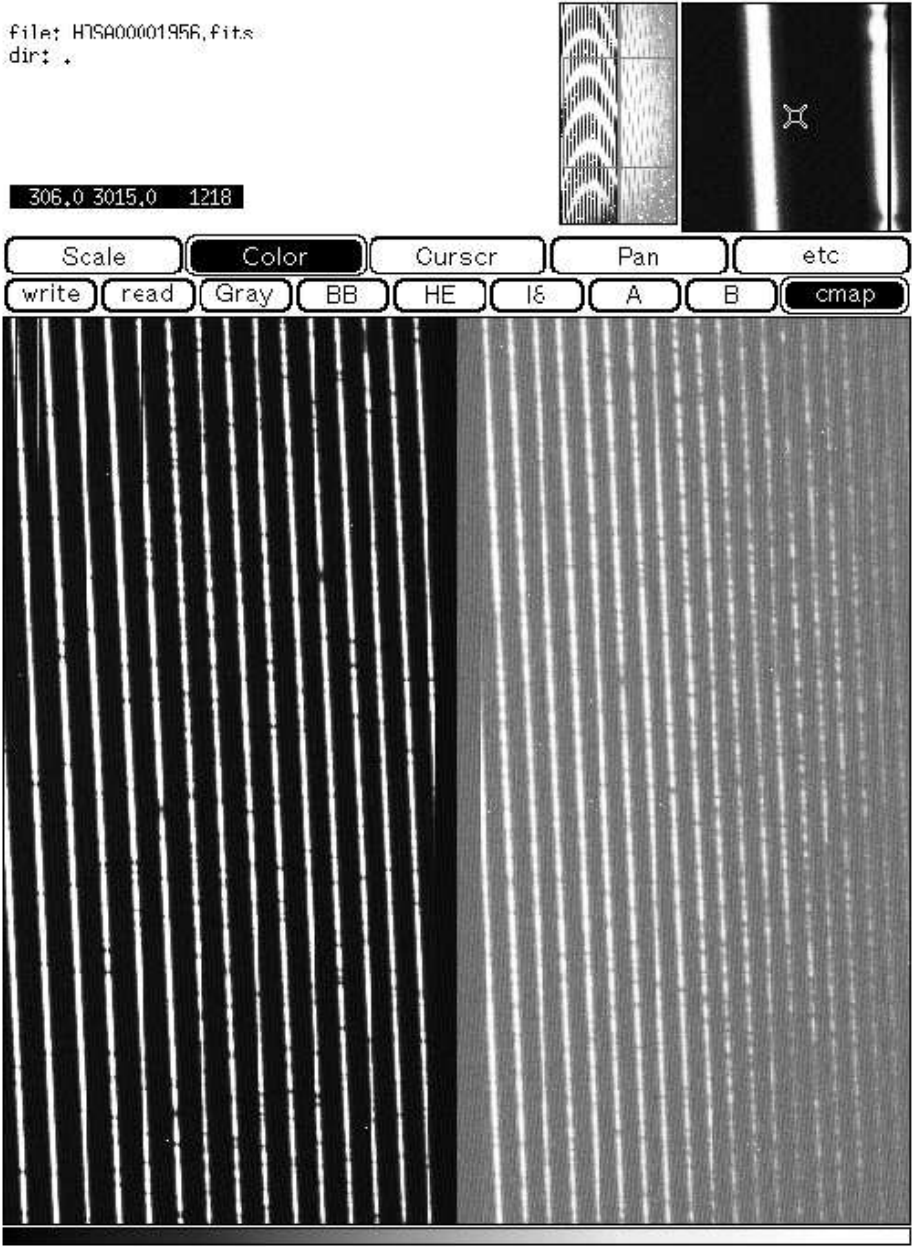


図 1.2: apflatten によるフラットデータ処理。(1) オーダごとのアパーチャ決定のようす

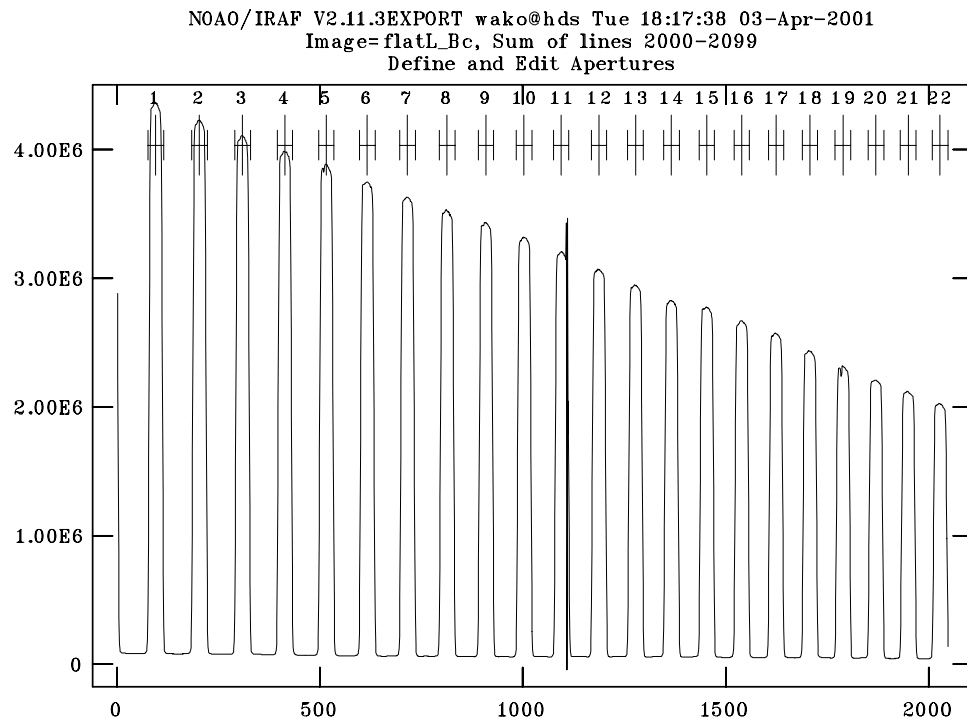


図 1.3: apflatten によるフラットデータ処理。(2) オーダトレースの例

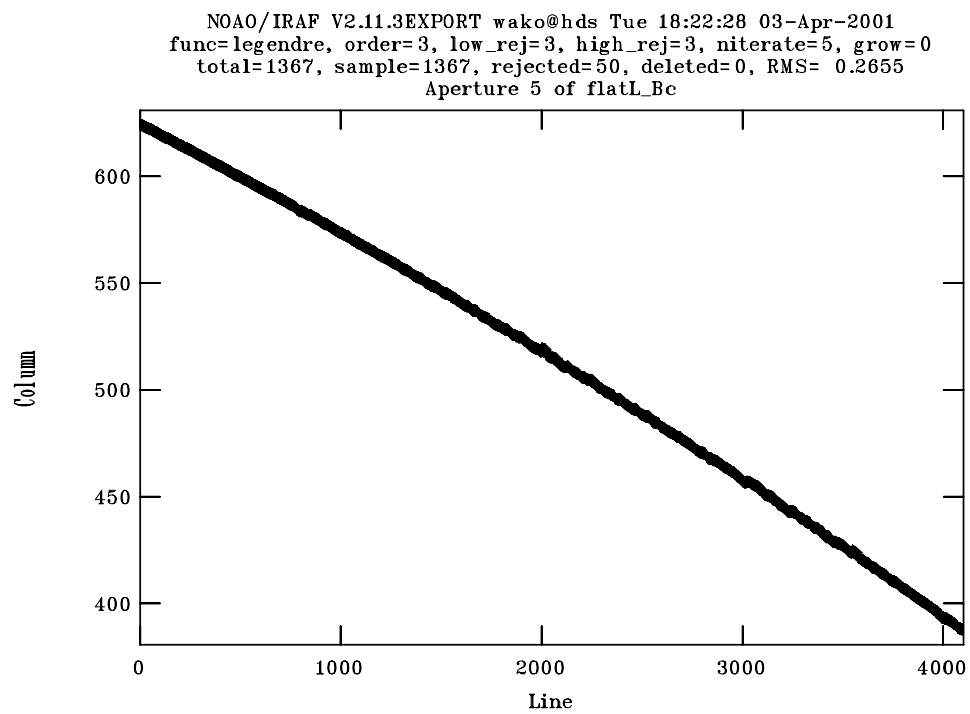


図 1.4: apflatten によるフラットデータ処理。(3) オーダごとに規格化する関数を決定するためのフィッティングを行っているところ

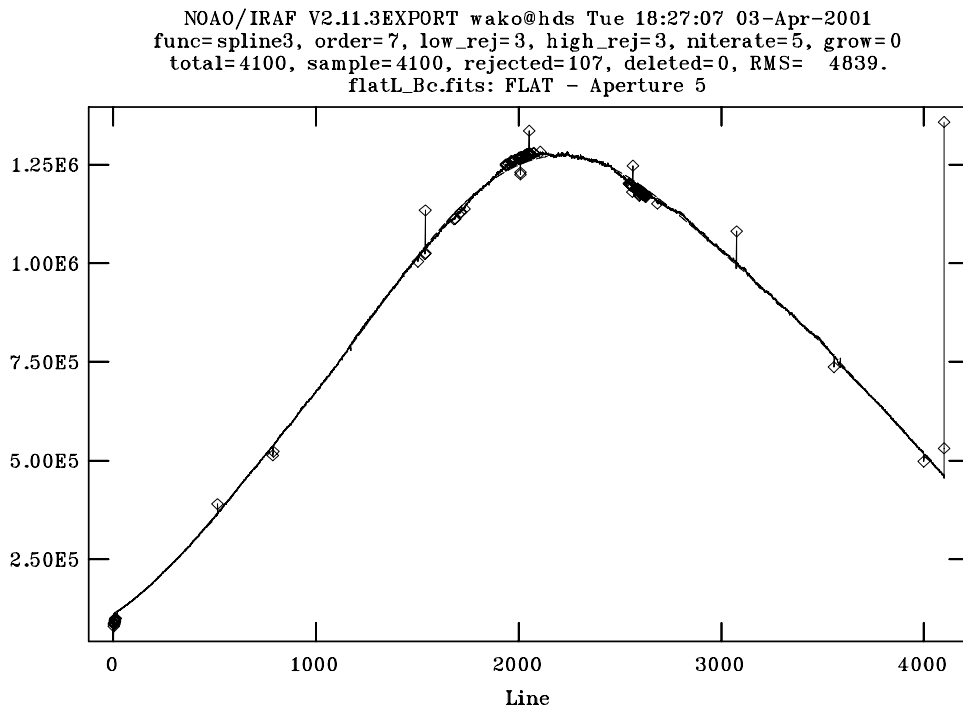


図 1.5: apflatten によるフラットデータ処理。(4) 規格化されたフラットデータの、スリット方向断面図

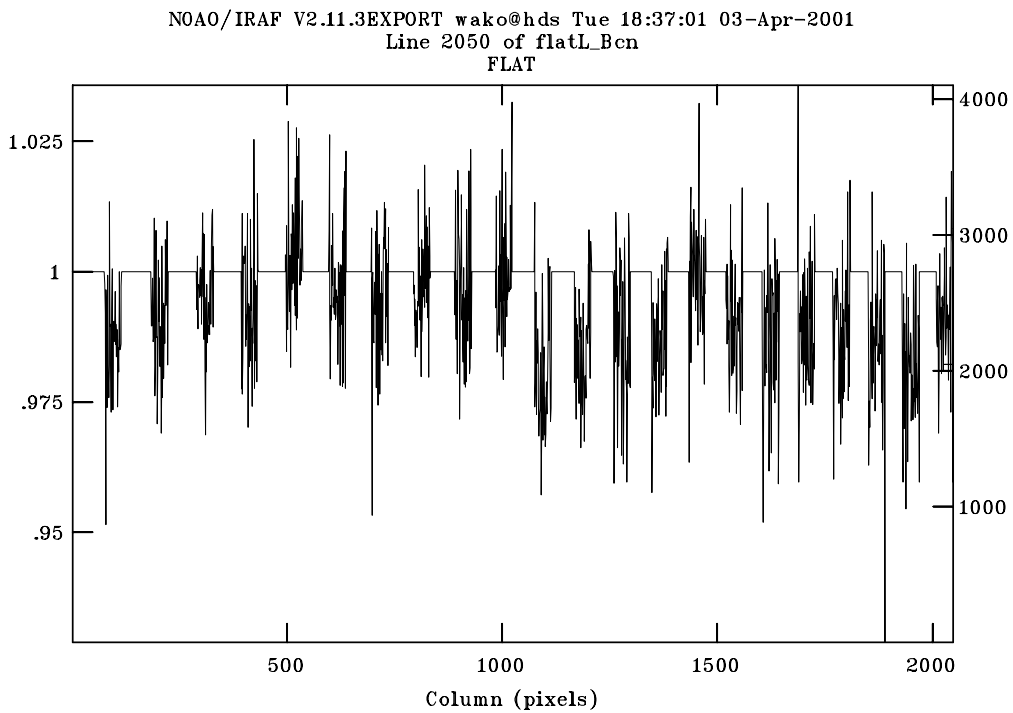


図 1.6: 大雑把に規格化したフラットフレームの例。スリット方向断面図

NOAO/IRAF V2.11.3EXPORT wako@hds Thu 17:54:16 05-Apr-2001

Line 2050 of flatL_Bc0

FLAT

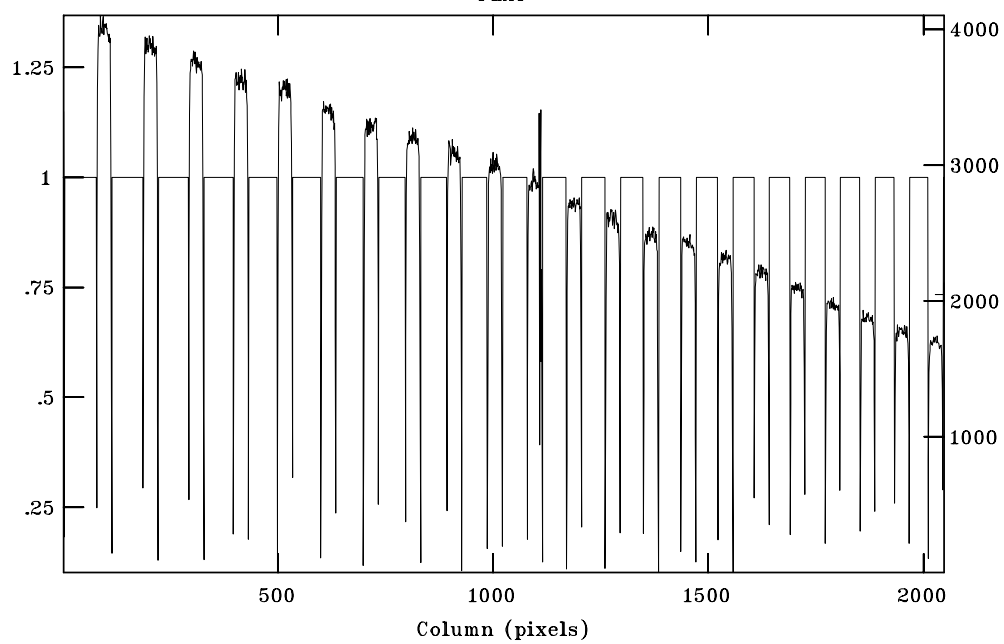


図 1.7: バックグラウンド除去を行う前の天体データ (スリット方向断面図)

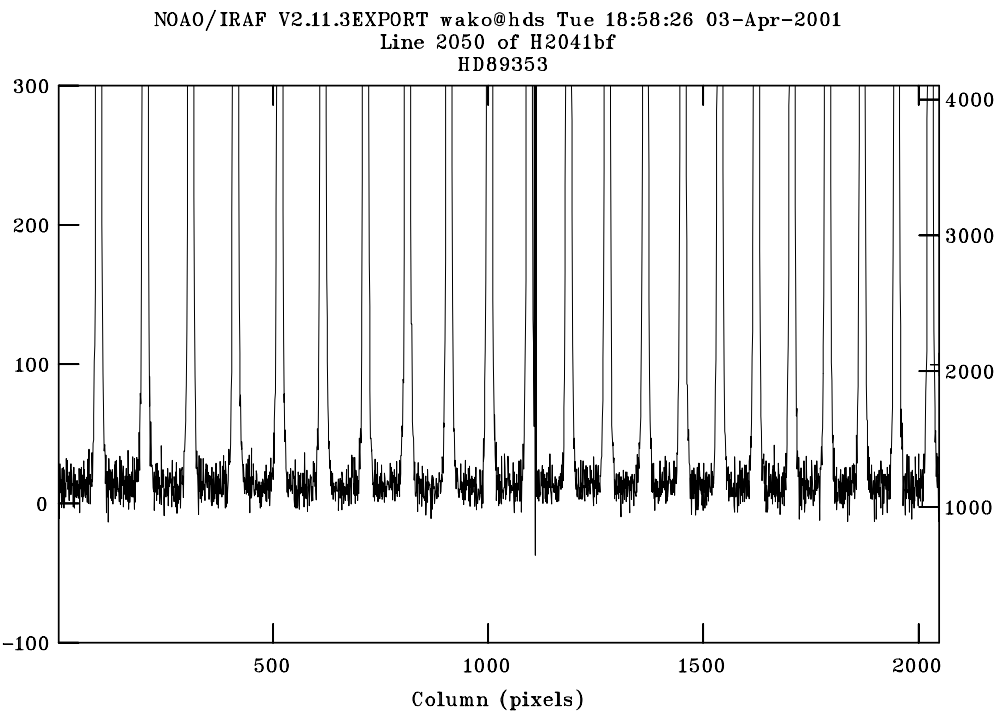


図 1.8: apscatter によるバックグラウンド処理。(1) オーダごとのアパーチャの決定のようす

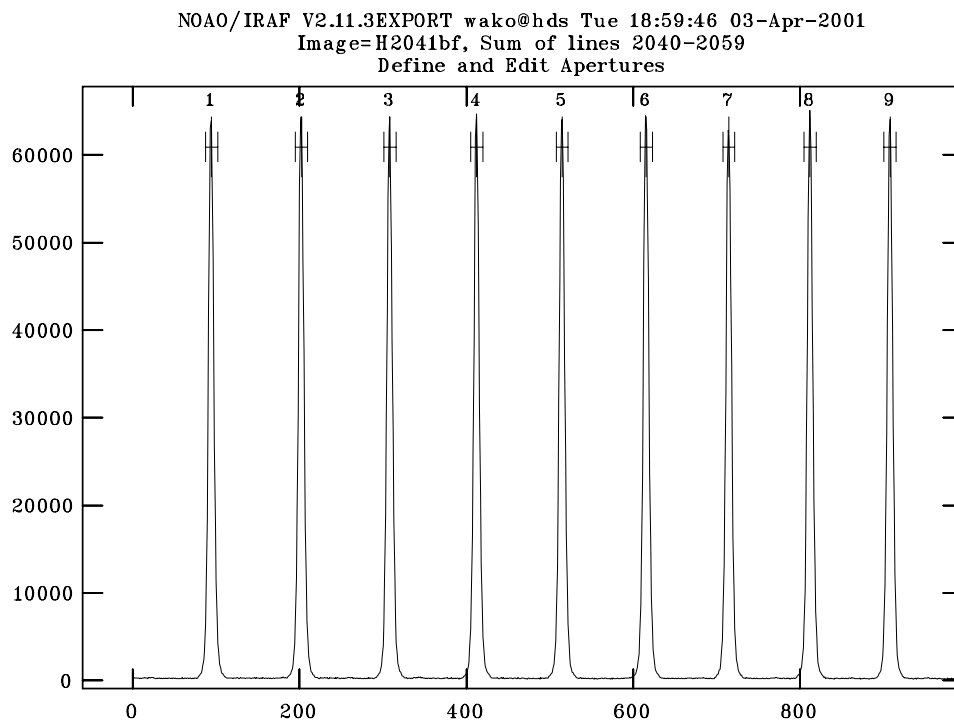


図 1.9: apscatter によるバックグラウンド処理。(2) 天体の光のあたっている部分をマスクし、バックグラウンドの平面フィットを行っているようす (スリット方向)

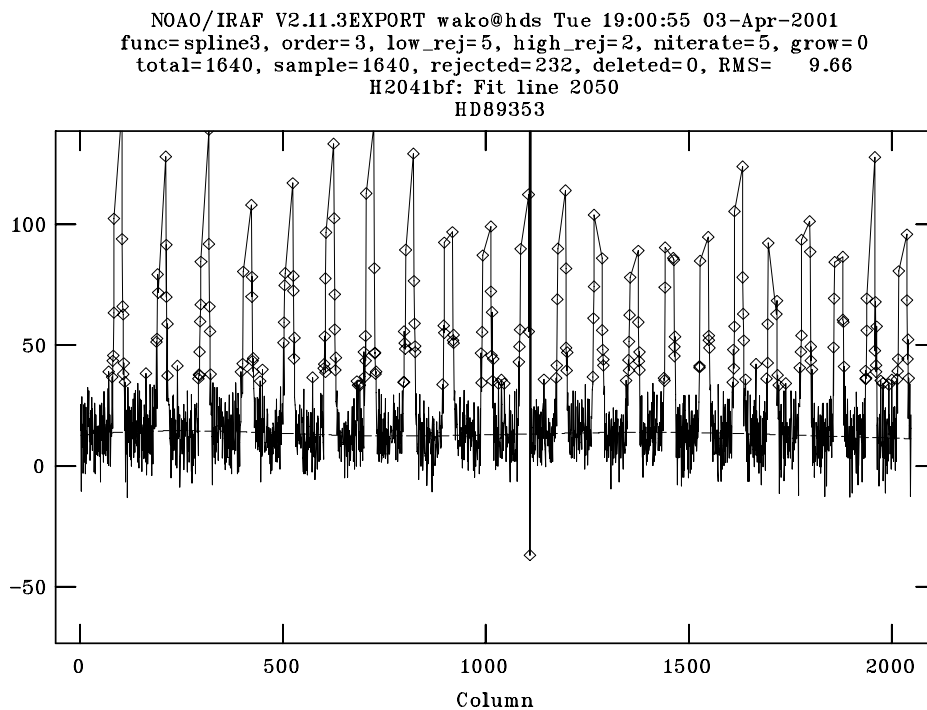


図 1.10: apscatter によるバックグラウンド処理。(3) 図 1.9 と同様 (ただし分散方向)

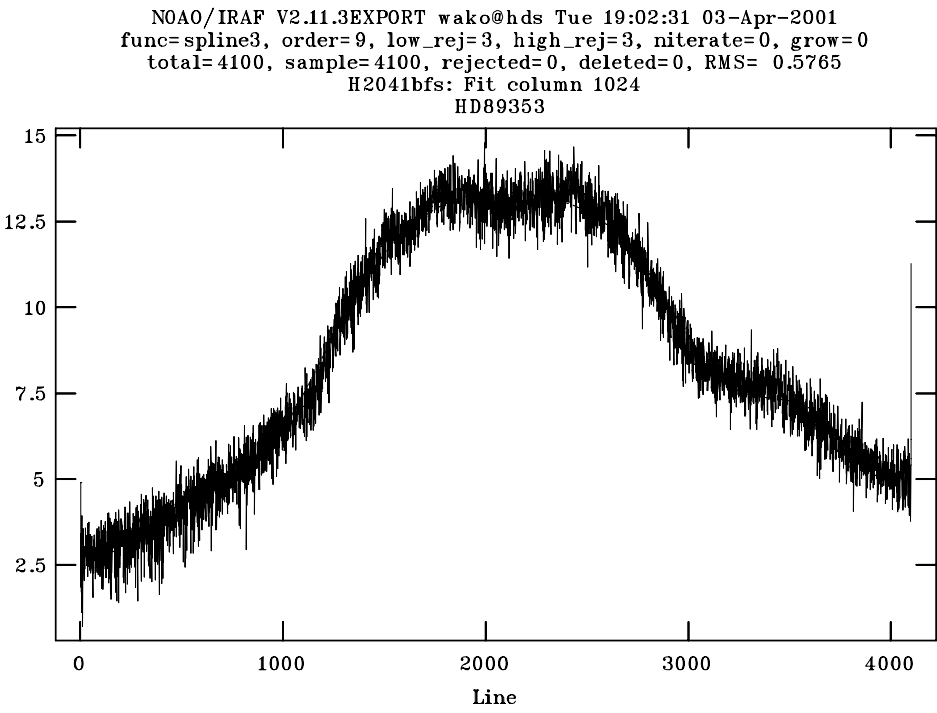


図 1.11: Th 線の同定作業

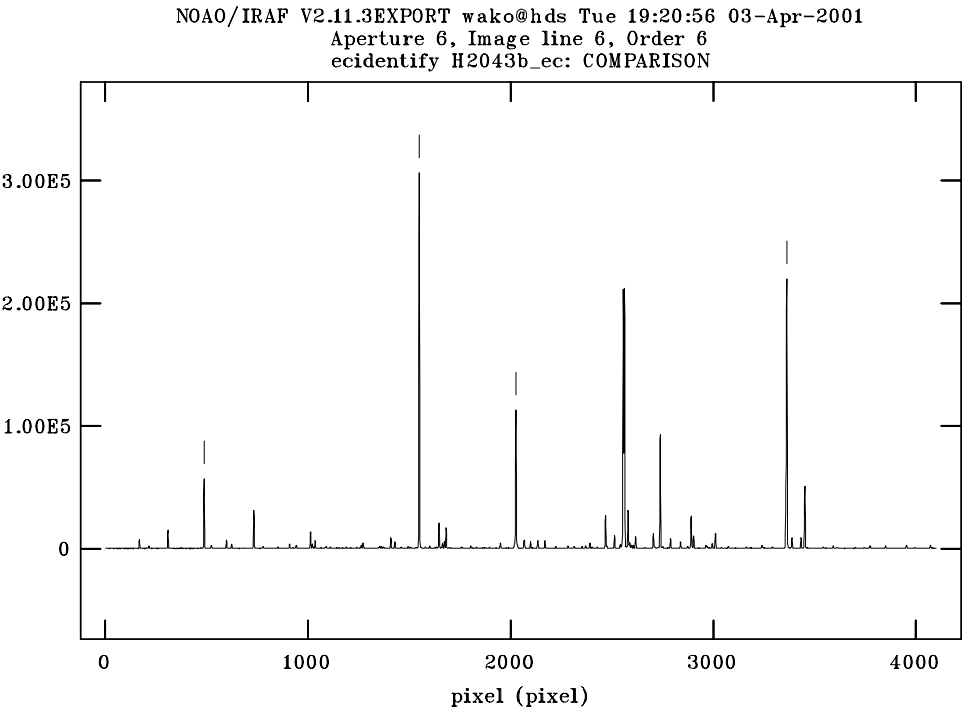
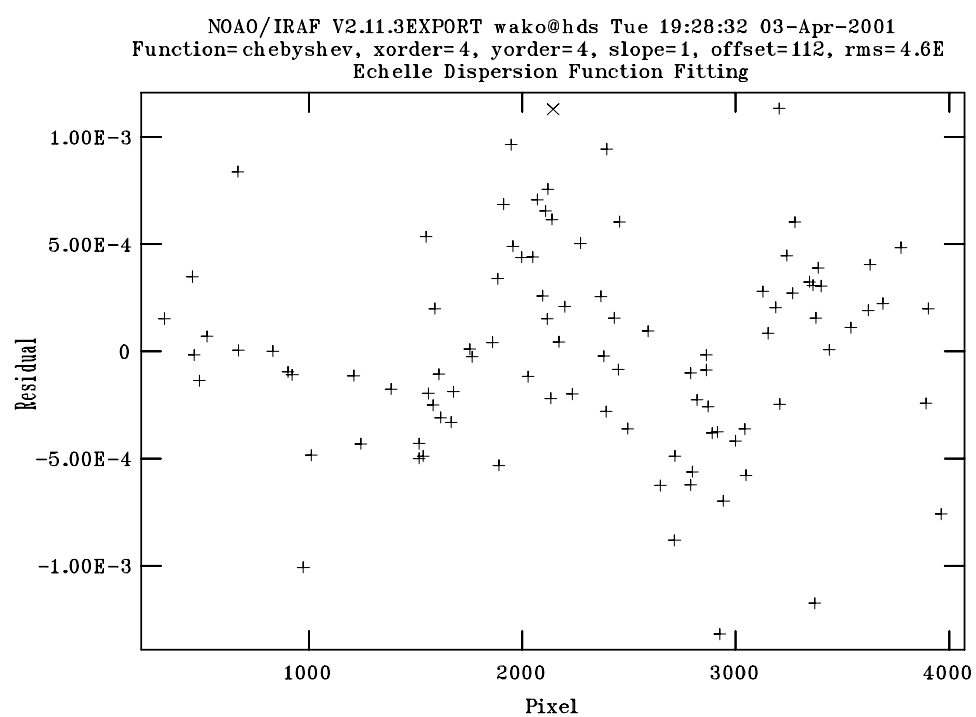


図 1.12: Th 線の波長スケールについて、関数フィットを行った後の残差



第2章 エシエルデータの処理：個別の課題

前の章では、エシエルデータの一次元化について基本的なことを説明した。本章では、宇宙線のあたったピクセルの処理、得られたスペクトルのフラックス較正もしくは規格化、オーダをつないで1本のスペクトルにすること、等々について説明する。これらは観測の目的によっては不必要なものもある。また、やり方が何種類かあったりするため、あくまで例としてご紹介するものである。また、データ処理の自動化についても触れる。説明の中で、必要に応じて処理の途中経過として現れる図や、指定するパラメータの例を示しているの、参考にしてもらいたい。

2.1 宇宙線ノイズの除去

高分散分光観測の場合、長時間露出を行うことが多いが、その場合には「コスミックレイイベント」と通常よばれる、非常に高いカウントをもったノイズが多数あらわれる（以下、宇宙線ノイズとよぶ）。これは文字通り宇宙線があたったことによってカウントが高くなったのかどうかは必ずしも明らかではないが、いずれにしてもノイズとして除去することが望ましい。なお、いわゆるホットピクセルも同様に高いカウント値を示すが、これは露出のたびに同じ位置に現れるため予測可能であるのに対し、宇宙線ノイズは毎回どこにあらわれるかわからない。

宇宙線ノイズを完全に除去することは困難であり、解析に必要とする波長域にあたっていなければとくに処理しないということもありうる。以下に紹介する処理方法もあくまでひとつの例である。

2.1.1 同一天体を同一フォーマットで3フレーム以上撮ってあるとき

露出時間を稼ぐ場合には、数枚続けて同じ天体を同じスペクトルフォーマットで撮ることが多い。この場合には、宇宙線の当たってしまったピクセルについては、他のフレームのデータを用いて埋め合わせることが可能である。ただしそのピクセルについては S/N 比が下がってしまうのはもちろんである。

例えば、30分露出のフレームが3枚(A、B、Cとする)撮ってあったとする。3枚のフレームのカウント値が、天候の変化などにより大きく異なっている場合は適当にスケールしてカウントを合わせておく(タスク `imarith` で可能)。

`imcombine` を用いて3枚のメディアンをとる(結果を `medianABC` とする)。2枚以上について同一ピクセルに宇宙線が当たらない限り、`medianABC` には宇宙線ノイズはのらない。各フレームを `medianABC` でわる。

$$a=A/\text{medianABC}, b=B/\text{medianABC}, c=C/\text{medianABC}$$

a、b、c は、全体はほぼ1程度のカウントを持つフレームであるが、宇宙線ノイズが、非常に高い値

をもったピクセルとして残されている。そこで、全体のノイズレベルより著しく高い値をもつピクセルについては、値を 1 に置き換える (a' 、 b' 、 c' とする)。これはタスク `imreplace` で可能であるが、(3) で示すように、`lineclean` を用いたほうがよい場合もある。

a' 、 b' 、 c' に `medianABC` をかけると、目的とする宇宙線ノイズの取り除かれたフレームができる。

$$A'=a'\times\text{medianABC}, B'=b'\times\text{medianABC}, C'=c'\times\text{medianABC}$$

2.1.2 同一天体を同一フォーマットで 2 フレーム撮ってあるとき

例として、30 分積分のフレームが 2 枚 (A、B) あったとする。この場合は (1) のようにメディアンをとることができないので、以下のようにする。2 枚のカウントはほぼ揃えておく。

2 枚のフレームの差をとる。

$$d=A-B$$

すると、 d は全体が 0 カウント程度のフレームになるが、A で宇宙線のあたったピクセルは非常に高い値をもち、逆に B であたったピクセルは非常に小さい値をもつ。`imreplace` (もしくは `lineclean`) で高い値を 0 に置き換えたフレームを a 、低い値を 0 に置き換えたフレームを b とする。`imarith` で

$$A'=B+a, B'=A-b$$

を計算すると、宇宙線ノイズがほぼとれたフレーム A' 、 B' が得られる。ただし、この場合は補正されたピクセルについては、S/N 比が低くなっている。

2.1.3 フレーム 1 枚だけのとき

あるフォーマットである天体を 1 枚だけとった場合について考える (フレーム名を A とする)。

`median` を用いて、A にメディアンフィルタをかけたイメージ `medianA` を作成する。その際、パラメータ `xwindow`、`ywindow` で、メディアンをとる範囲を x, y について指定する。例えばそれぞれ 3 ピクセルに設定すると、A の各ピクセルについて、周囲 3×3 ピクセルのメディアンをとったフレームができる。もとの A に比べ少しなまったイメージではあるが、このフレームには基本的に宇宙線ノイズはのらない。

$$a=A/\text{medianA}$$

により、全体が 1 カウント程度で、宇宙線ノイズがのったフレーム a ができる。しかし、この場合には、全体がかならずしもフラットにはならないため、`imreplace` で高いカウントのピクセルを 1 に置き換えるという方法は有効ではない。ここでは、`lineclean` を用いる。これは検出器の各行について、ある関数のカーブをフィットし、そこから大きくはずれた値をもつピクセルについては除去し、フィットした

カーブによって補間する。用いる関数や除外する基準はパラメータとして指定できる。インタラクティブにやると、何行目についてのフィットの様子を見たいか聞いてくる。各行についてフィットの様子を確認することが可能だが、全部見ていると夜が明けるので適当なところで行数として * を入力するとすべての行について処理してくれる。このようにして一方向について作業が終わったら、`imtrans` によって x 軸と y 軸を入れ換え、同様に `lineclean` を行う。ふたたび `imtrans` によって x 軸と y 軸を入れ換えると、宇宙線ノイズのとれたフレーム a' ができるので、

$$A' = a' \times \text{median} A$$

とすると、宇宙線ノイズの取り除かれたフレーム A' がえられる。

2.2 夜光の除去

可視域の観測の場合、赤外観測に比べれば夜光の影響は小さいが、天体が暗い場合には OH 夜光などの輝線がスペクトルにのることになる。フレーム全体にわたるグローバルな背景光の除去については基本編で紹介した (apscatter) が、そこでは輝線の除去については触れなかったのでここで説明する。

この処理は、apall でスペクトルの一次元化を行う際に、パラメータ backgro に average や median を指定することによって可能である (何もしない場合は none)。夜光の強さの評価を行う範囲について b_sampl で指定すると、その部分の平均値やメディアンなどが差し引かれることになる。非常に強い夜光の場合は、きれいに取り除くのは困難である。

もちろん、解析に必要な波長にのった夜光なら、無視してしまってもよい。筆者は夜光の除去についてはほとんど経験がないので、以上はあくまでヒントとして読んでもらいたい。

2.3 スペクトルの規格化、フラックス校正

第1章では、データを一次元化し、各オーダーについて波長をわりつけたスペクトルが得られるようになるまで説明した。こうしてえられたスペクトルには、エシェルグレーティングの特性などがそのまま残ってしまっている。

このスペクトルから、例えば組成解析を行う場合には、コンティニュームを決定してスペクトルを規格化する必要がある。また、QSO や、コンティニュームのよく見えない星の解析などにあたっては、フラックス校正をしたいと思うかもしれない。これらの処理は、目的によって工夫されるべきことではあるが、基本的な処理は IRAF を用いて比較的容易に行うことができ、工夫を加えることも可能である。

2.3.1 フラットフレームを用いたグレーティング特性の校正

一次元化されたスペクトルの例を図 2.1 に示したが、ここにはエシェルグレーティングの特性や星のエネルギー分布などが混ぜ合わさって現れている。このスペクトルを規格化する際に、まず大雑把にエシエルの特性が取り除かれていると規格化の処理がやりやすい。

第1章では、フラットフレーム FLAT の規格化の方法について説明した。規格化されたフラットフレーム (FLAT_N) で FLAT を割ると、アパーチャとして切り出した部分については、ピクセル間の感度ムラが取り除かれた、のっぺりしたフラットフレームになる (このフレームを BLAZE とする) :

$$\text{BLAZE} = \text{FLAT} / \text{FLAT_N}$$

これを天体と同様に apall で一次元化すると、のっぺりしたフラットのスペクトルが得られる (BLAZE.ec)。このスペクトルは、エシェルグレーティングの特性を大雑把にあらわしているので、このスペクトルを規格化 (カウントの平均を 1 にする) したもの (BLAZE.ecn、図 2.2) で天体のスペクトルを割ると、エシエルの特性が大雑把には校正されたスペクトルが得られる (図 2.3)。

BLAZE.ec の規格化は、boxcar で行うことができる (2.6.1)。パラメータとして、xwindow = 分散方向のピクセル数 (e.g. 4100)、ywindow=1 と設定すると、各オーダーのスペクトルの平均のカウントをもったフレームが得られるので、これで BLAZE.ec を割ると、規格化されたフレーム BLAZE.ecn (図 2.2) が得られる。

2.3.2 天体スペクトルの規格化

前節のようにして得られたスペクトルのコンティニュームをフィットして、スペクトルを規格化する方法を説明する。前節の作業がすんでいれば、比較的 low 次関数でコンティニュームを決めることが可能であるはずである。(なお、著しい金属欠乏星のように、コンティニュームがきれいに見えている天体のスペクトルの場合には、前節の作業は省いても大丈夫かもしれない。)

この作業には、continuum を用いる。このタスクを実行すると、各オーダーについてインタラクティブに、ある関数のカーブをフィットしてくれる。関数の種類や次数については、パラメータとして与えることもできるし、インタラクティブに与えることも可能である。フィットする範囲の指定も変えられる。

(これらについては基本編で行った作業と共通である。必要ならヘルプ参照。) 前出のスペクトル (図 2.3) に、ある関数のカーブをフィットした様子を図 2.4 に示した。規格化の結果は、`splot` で見られる (図 2.5)。(なお、図に示した例は、規格化がかならずしもうまくいっているとはいえない。このような強く太い吸収線がある場合には、もっと注意深い処理が必要だろう。)

2.3.3 フラックス較正

フラックス較正を行うには、標準星のスペクトルを、目的天体と同じ設定で撮り、同じ設定で整約を行って一次元のスペクトルを得ておく (STD.ec とする)。標準星としては、エネルギー分布があらかじめわかっている星を用いる。まず、標準星のスペクトルについて、適当に bin をきってそのカウントの平均をとる。これを適当な関数でフィットし、波長とカウントの曲線 (つまり、なまされた標準星のスペクトル) をつくり、えられた曲線を標準星のエネルギー分布と比べ、レスポンスファンクションを得る。このレスポンスファンクションで目的天体を較正する。

用いるタスクは、`standard`、`sensfunc`、`calibrate`。`standard` のパラメータ設定の例を 2.6.2 に示した。用いる標準星のスペクトル (STD.ec) を指定し、bin ごとにえられたカウントを書き出すファイルを `output` で指定する。標準星のエネルギー分布のテーブルの入ったディレクトリを `caldir` で指定する。IRAF には較正用のデータがある程度整備されている。どんなデータがあるかは、

```
page onedstds$README
```

で調べることができる。例では `onedstds$spec16cal` を指定している。用いる星の名前は `star_nam` で指定する。標準星を撮ったときの露出時間と `airmass` も書いておく。このタスクを実行すると、図 2.6 に示したように、標準星のスペクトルを、bin をきってカウントをそのだしている様子が表示される。気に入らないところはインタラクティブに変更可能である (ヘルプ参照)。例で示した波長域には地球大気での吸収が効いている部分があり、この部分の較正は困難である。

次に、`sensfunc` により、レスポンスファンクションを決定する。パラメータの例を 2.6.3 に示した。`standard` には `standard` でできたファイル `std` を指定する。`sensitive` に例えば `sens` をいう名前を指定すると、結果として各オーダについて `sens.0001`, `sens.0002`, ... という名前のレスポンスファンクションが得られる。結果の一部を図 2.7 に示した。上段が関数フィットの様子、下段がその残差である。これもインタラクティブに修正可能である。

得られた `sens.00nn` を用いて目的天体のフラックス較正を行うのが `calibrate` である。パラメータの例を 2.6.4 に示した。`input` には目的天体のスペクトルを指定する。目的天体を撮ったときの露出時間と `airmass` も指定する。図 2.6 と同じオーダについて得られた QSO のスペクトルの例を図 2.8 に示す。

以上のように、フラックス較正を行うことは IRAF で可能であるが、その精度は観測条件の安定性などによって決まるところが大きく、上述のような正攻法だけではうまくいかないこともあるようである。筆者はフラックス較正を必要とするデータの解析をほとんどやったことがないので、この節の説明はあくまで参考ということで、読者には自分で研究をしていただきたい。

2.4 スペクトルの一本化

各オーダごとに規格化されたスペクトルは、`scombine` を用いてつなげることができる。波長が2つのオーダでダブっている場合は、その平均をとるなどの処理が可能である。検出器サイズの制約などにより、フリースペクトラル・レンジがカバーできていない場合には、途中で切れたスペクトルが一つの波長軸に並べられたスペクトルになるだけである。

`scombine` では、`input`、`output` のファイル名を指定するほか、`group` は 'images' とし、`combine` については 'average' などとする。

検出器サイズが大きく、フリースペクトラル・レンジを十分にカバーしている場合、逆に各オーダのデータすべてを用いてしまうと、検出器の端の方の S/N 比の悪い部分も使われてしまう。これを避けるために、例えば分散方向が 4100 ピクセルの場合には、`input` ファイルの指定のところで、

```
input=OBJ.ec[501:3600,*]
```

のように与えると、各オーダについて端の 500 ピクセルを切り落としたデータをコンバインしてくれる（もちろん一度トリミングしてしまったファイルを作っておいてもよい）。

フラックス校正したスペクトルも、`scombine` で結合可能だが、校正が十分に良くできていないと、オーダ間にギャップが生まれてしまう。この補正の方法は、データ処理ソフトウェアの問題にとどまらないのでここでは省く。

なお、`scombine` は、複数のフレームから得られたスペクトルの足し合わせ（平均）にも用いられる。

```
input=A.ec,B.ec,C.ec
```

のように与え、`group` には 'aperture'、`combine` には 'average' などと与えると、3つのスペクトルの平均が得られる。各データの S/N 比に応じてウェイトをかけることもできる。

2.5 データ処理の自動化

これまで説明・紹介してきたデータ整約のうち、比較的単純で繰り返し行われる部分については、ある程度自動化して処理できることが望ましい。IRAF では、doecspec というタスクでかなりの部分を行えるようである。しかし、ここでは独自にマクロを作成してデータ処理を行う方法を紹介する。筆者もこの点については検討中であり、マクロといってもタスクを並べただけのものではあるが、それでもデータ処理における単純ミスを防ぎ、少しでも省力化することが可能になる。作成したのは、フラットの規格化を行う部分 `wamkff` と、背景光除去および一次元化を行う部分 `waextract` である（次頁以降参照）。

これらをタスクとして用いるためには、

```
task wamkff=wamkff.cl
task waextract=waextract.cl
```

とやっておく。

`wamkff` では、1) において、バイアスの除去や、複数枚のメディアンをとるなどの処理が済んだフラットフレームから、規格化されたフラットを得るまでの作業を行う。その際に、オーダ検出のためのフレーム（スリット長の短いフラットもしくは星のフレーム）を与え、それをレファレンスとしてアパーチャ決定を行うようにしている。さらに、2) 以降では、2.3 節で紹介した、フラットフレームを用いたグレーティングの特性等の較正を行うためのスペクトル（BLAZE.ecn）をえるまでの処理も行っている。入出力ファイルの指定は、`epar wamkff` でできる。

`waextract` では、天体の二次元イメージについて背景光除去を行い、一次元化し、BLAZE.ecn で割ってグレーティングの特性等の較正を行うまでの処理を行っている。ここでは、一次元化する際には、背景光除去の際に決定したアパーチャをそのまま用いている。作業をインタラクティブにやるかどうかパラメータ（`interac`）として与えることができる。これを `no` にしておくと、以上の処理をすべて自動的にやって一次元スペクトルを返してくるので、同じフォーマットのデータを繰り返し処理する場合などに便利である。

詳しくは、

「IRAF を基本システムとした データ解析ソフトウェア開発の手引」（1997 年 3 月、天文情報処理研究会）

などを参照のこと。

```
#####
# wamkff.cl                               W. Aoki   26 Jan.  1999
#####
# 1)QUARTZ frame (combined) => normalized flat frame
# 2)Produce blaze profile
#    QUARTZ / med(QUARTZ) => smoothed QUARRTZ
#    extraction of smoothed QUARRTZ
#    normalization => blaze profile
#
# Set parameters for:  apfind, aprecent, apresize, apedit
#                      apflatten, aptrace
#                      apall
#    (parameters of boxcar are given in this procedure)
#####
procedure wamkff(sq_f,f_f,nf_f,nbl_f)

# Input
  string sq_f  {prompt = 'Short quartz frame name'}
  string f_f   {prompt = 'Flat   frame name'}
#Output
  string nf_f  {prompt = 'Output Norm. Flat frame name'}
  string nbl_f {prompt = 'Output Norm. Blaze profile name'}

begin
string  flat_f, sqtz_f, normflat_f
string  blaze_f,  blaze_ec_f, blaze_ec0_f, blaze_ecn_f

  flat_f = f_f
  sqtz_f = sq_f
  normflat_f = nf_f
  blaze_ecn_f = nbl_f

#temporary files
  blaze_f = "blaze_tmp"
  blaze_ec_f = "blaze_ec_tmp"
  blaze_ec0_f = "blaze_ec0_tmp"

### 1)QUARTZ frame (combined) => normalized flat frame ###
## apfind for short quartz frame
apfind(input=sqtz_f)
#    interac=yes, find=yes, recente=yes, resize=yes, edit=yes)

## apflatten
apflatten(input=flat_f,output=normflat_f,referen=sqtz_f)

### 2)Produce blaze profile ###
## QUARTZ / med(QUARTZ) => smoothed QUARRTZ
imarith(operand1=flat_f,op="/",operand2=normflat_f, result=blaze_f)

## extraction of smoothed QUARRTZ
apall(input=blaze_f,output=blaze_ec_f, referen=flat_f, \
      interac=yes, find=no, recente=no, resize=no, edit=no, trace=no)

## normalization => blaze profile
boxcar(input=blaze_ec_f,output=blaze_ec0_f,xwindow=1024,ywindow=1, \
      boundar='wrap')
```

```
sarith(input1=blaze_ec_f,op="/",input2=blaze_ec0_f, output=blaze_ecn_f)
##

end
```

```
#####
# waextract          W. Aoki    3 June 1999
#####
# 1)Subtraction of SKY
#   apscatter, apfind, aprecenter, apresize, apedit, aptrace
# 2)Extraction
#   apall, aprecenter, apresize, apedit, aptrace
# 3)Normalization
#   Object / Blaze
#####
procedure ccd_proc(s_f,bl_ec,s_ec,sn_ec)

    string s_f   {prompt = 'Stellar frame name'}
    string bl_ec {prompt = 'Blaze profile name'}
    string s_ec  {prompt = 'Output extracted profile name'}
    string sn_ec {prompt = 'Output normalized profile name'}
    bool interact {prompt = 'Ran task interactive? (yes/no)'}

begin
string  star_f, ref_f, stars_f
string  blazen_ec, star_ec, starn_ec

    star_f = s_f
    blazen_ec = bl_ec
    star_ec = s_ec
    starn_ec = sn_ec

#temporary files
    stars_f = "stars_tmp.imh"

### 1)Subtraction of SKY ###
apscatter(input=star_f,output=stars_f,interac=interact)

### 2)Extraction ###
apall(input=stars_f,output=star_ec,referen=star_f,interac=interact)

### Normalization ###
sarith(input1=star_ec,op="/",input2=blazen_ec, output=starn_ec)
##
end
```

2.6 パラメータの設定例

2.6.1 boxcar

```

                                I R A F
                        Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = imfilter
TASK = boxcar

input  =          blL_bc1_ec  Input images to be fit
output =          blL_bc1_ec0 Output images
xwindow =          4100      X dimension of box
ywindow =           1        Y dimension of box
(boundar=          wrap) Boundary (constant,nearest,reflect,wrap)
(constan=           0.) Constant for boundary extension
(mode   =          ql)

```

2.6.2 standard

```

                                I R A F
                        Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = echelle
TASK = standard

input  =          H2037bfs_ecw Input image file root name
output =          test      Output flux file (used by SENSFUNC)
(samesta=          yes) Same star in all apertures?
(beam_sw=          no) Beam switch spectra?
(apertur=          ) Aperture selection list
(bandwid=          5.) Bandpass widths
(bandsep=          5.) Bandpass separation
(fnuzero= 3.68000000000000E-20) Absolute flux zero point
(extinct=          ) Extinction file
(caldir = onedstds$spec50cal/) Directory containing calibration data
(observa=          ) Observatory for data
(interac=          yes) Graphic interaction to define new bandpasses
(graphic=          stdgraph) Graphics output device
(cursor =          ) Graphics cursor input
star_nam=          hilt600 Star name in calibration list
airmass =           1.      Airmass
exptime =          300.     Exposure time (seconds)
answer  =          YES!    (no|yes|NO|YES|NO!|YES!)
(mode   =          ql)

```

2.6.3 sensfunc

```

                                I R A F
                        Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = echelle
TASK = sensfunc

standard=          test  Input standard star data file (from STANDARD)
sensitivity=       test1 Output root sensitivity function imagename
(apertur=          ) Aperture selection list
(ignorea=          no) Ignore apertures and make one sensitivity fun(logfile=
(extinct=          ) Extinction file
(newexti=          extinct.dat) Output revised extinction file
(observa=          ) Observatory of data
(function=         spline3) Fitting function
(order =           4) Order of fit
(interac=          yes) Determine sensitivity function interactively?
(graphs =          sr) Graphs per frame
(marks =           plus cross box) Data mark types (marks deleted added)
(colors =          2 1 3 4) Colors (lines marks deleted added)
(cursor =          ) Graphics cursor input
(device =          stdgraph) Graphics output device
answer =           yes  (no|yes|NO|YES)
(mode =            ql)

```

2.6.4 calibrate

```

                                I R A F
                        Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = echelle
TASK = calibrate

input =            APM08279L0 Input spectra to calibrate
output =           test2.fits Output calibrated spectra
(extinct=          no) Apply extinction correction?
(flux =            yes) Apply flux calibration?
(extinct=          ) Extinction file
(observa=          ) Observatory of observation
(ignorea=          no) Ignore aperture numbers in flux calibration?
(sensiti=          test1) Image root name for sensitivity spectra
(fnu =             no) Create spectra having units of FNU?
airmass =          1. Airmass
exptime =          13678. Exposure time (seconds)
(mode =            ql)

```

2.7 図

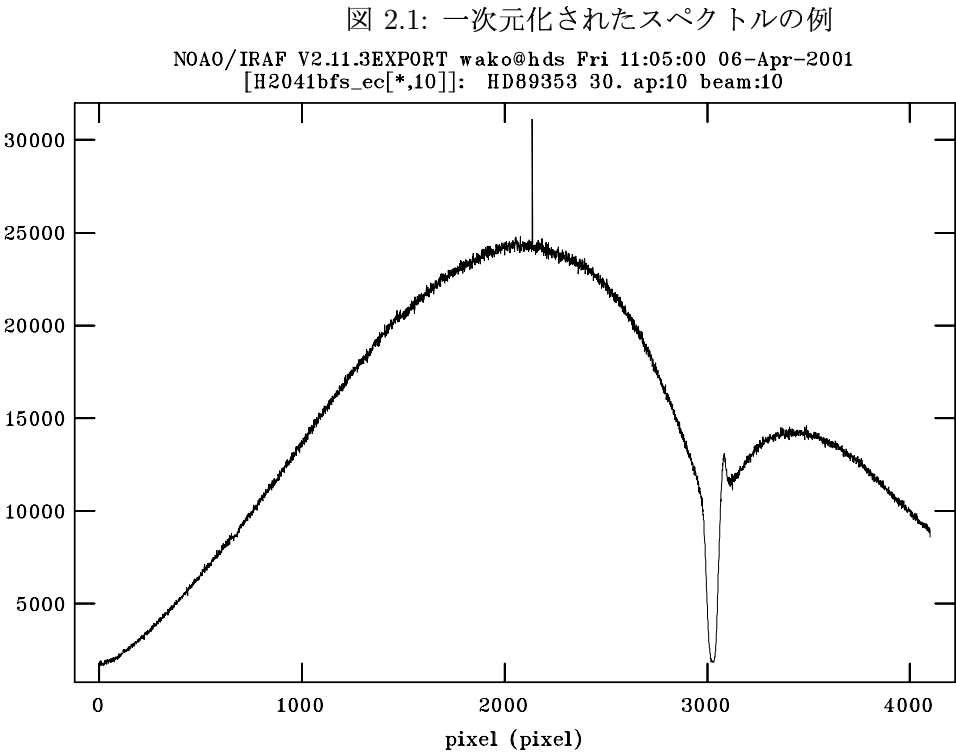


図 2.2: フラットスペクトルをもとに作成されたブレイズプロファイル

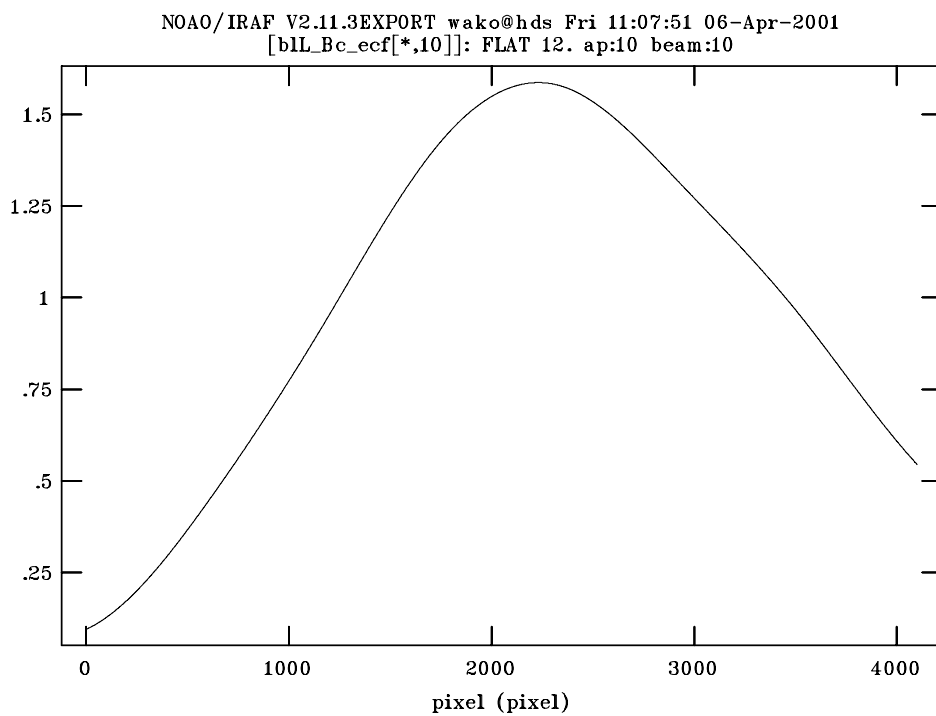


図 2.3: 図 2.3 のブレイズプロファイルで補正して得られたスペクトル

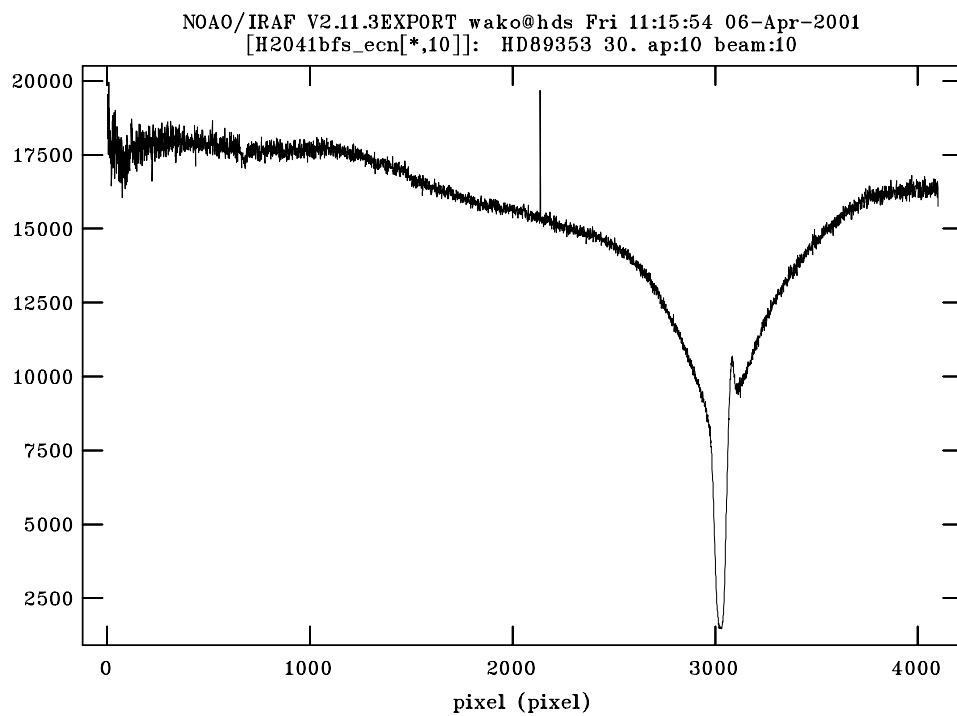


図 2.4: continuum による関数フィッティングの例

NOAO/IRAF V2.11.3EXPORT wako@hds Fri 11:20:12 06-Apr-2001
 func=spline3, order=3, low_rej=2, high_rej=0, niterate=10, grow=1
 total=4100, sample=2572, rejected=292, deleted=0, RMS= 216.2
 H2041bfs_ecn.fits, [10,1]
 HD89353

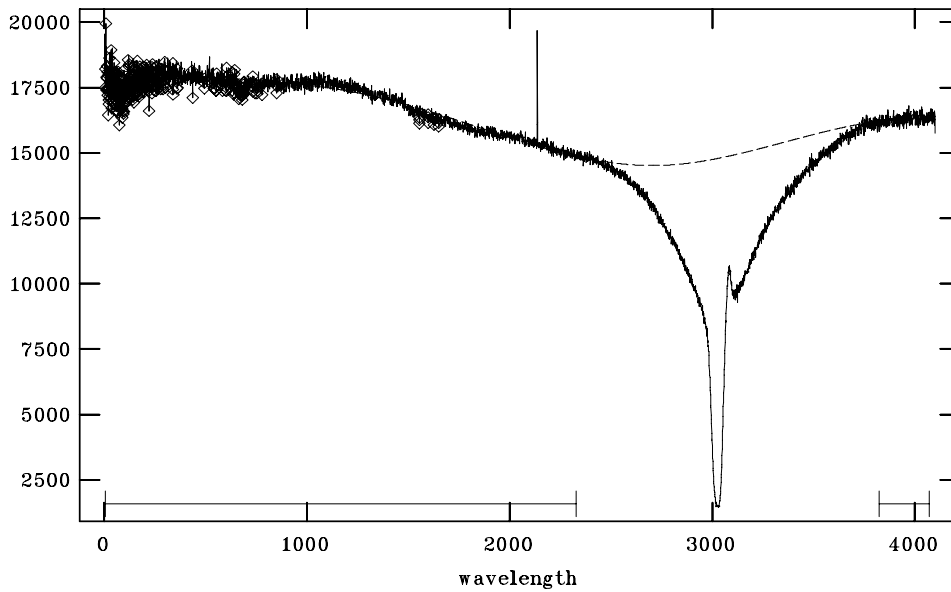


図 2.5: 規格化されたスペクトル

NOAO/IRAF V2.11.3EXPORT wako@hds Fri 12:16:19 06-Apr-2001
 [H2041bfs_ecnc[*,10]]: HD89353 30. ap:10 beam:10

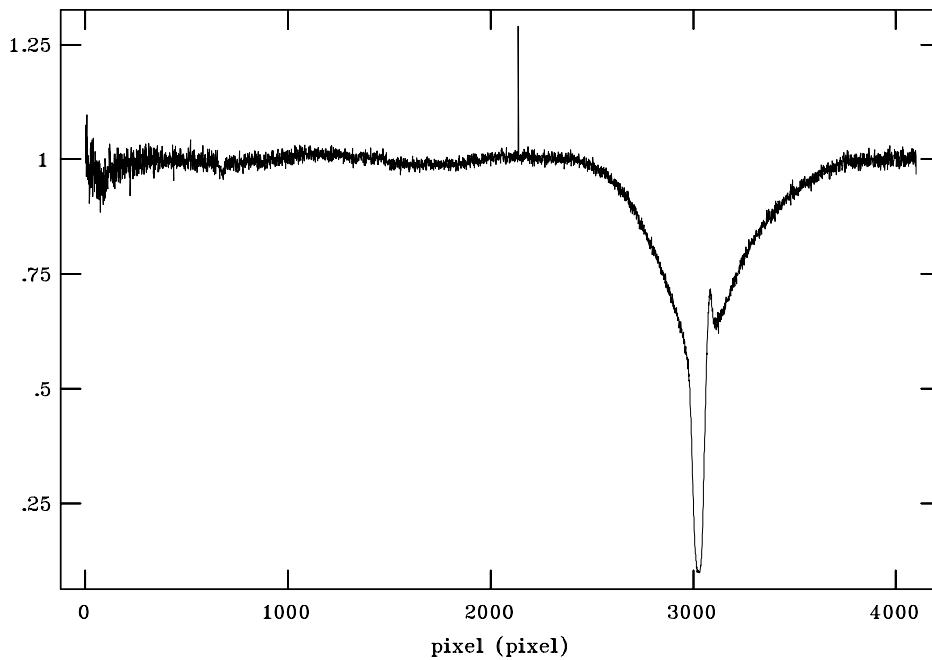


図 2.6: standard による標準星のスペクトルのカウント測定作業のようす

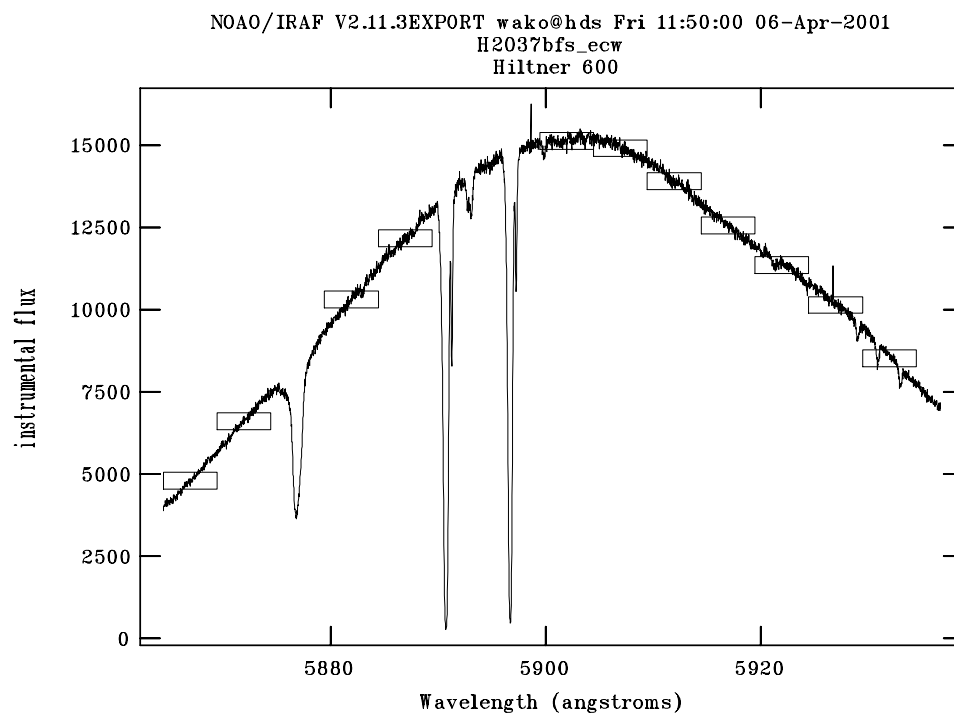


図 2.7: 標準星スペクトルの応答関数決定作業

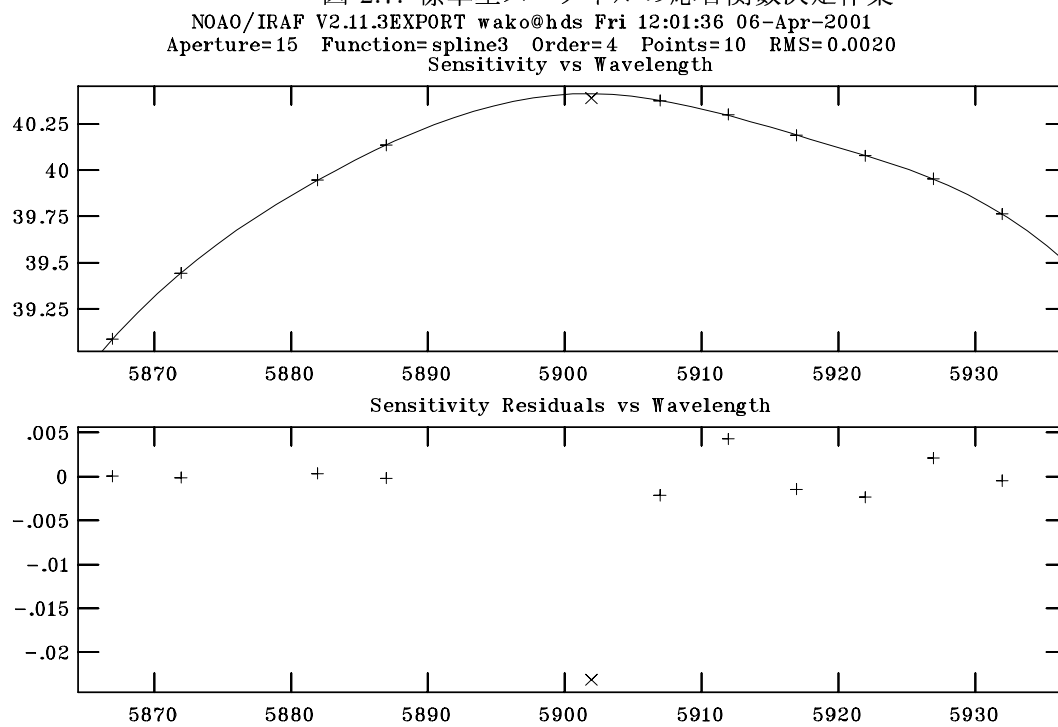
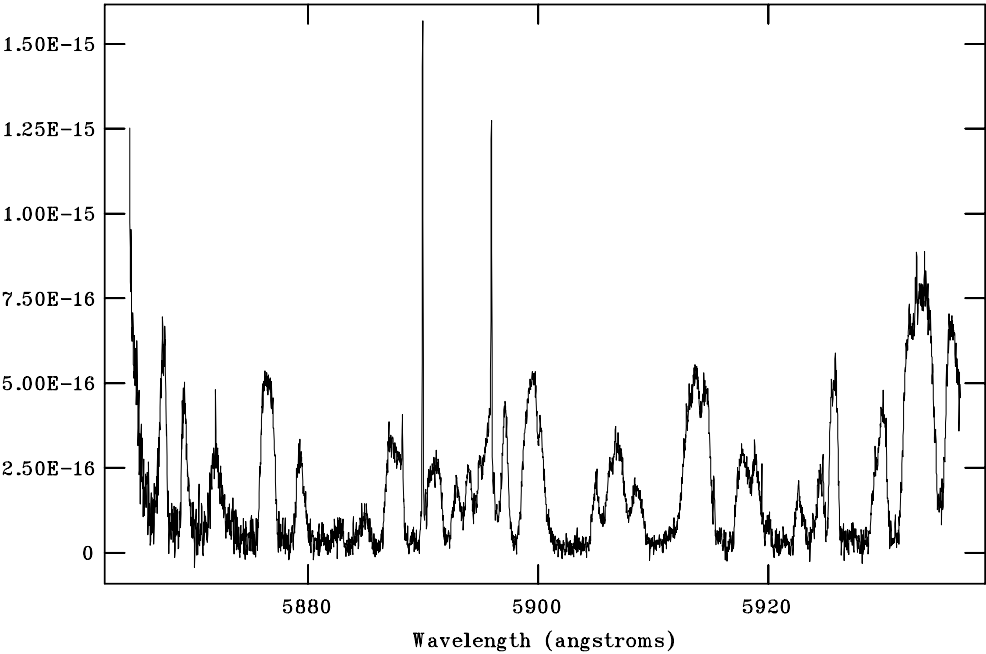


図 2.8: フラックス較正して得られたスペクトル

NOAO/IRAF V2.11.3EXPORT wako@hds Fri 12:04:12 06-Apr-2001
[test2[*,15]]: APM08279+5255 1.4E4 ap:15 beam:101



第3章 HDS データの特色とその処理方法

第1、2章で述べた内容は、標準的なエシエル分光器で得られたデータの整約において、ほぼ共通である。本章では、HDS データに特有な問題をあつかう。実際にデータ整約を行う場合には、まず本章で述べるデータ処理を行ったうえで、第1、2章で述べた整約に進むことになる。なお、本章で述べる内容は、HDS のユーザマニュアルにおける記述と、ほぼ同一である。

3.1 HDS データの基本的な特徴

3.1.1 フレーム番号

取得されたデータには通し番号 (フレーム ID) がつけられる。二つの CCD それぞれに対して FITS ファイルが作られるため、一回の露出に対して二つのフレーム ID が割り当てられる。フレーム ID は、'HDSA' につづく 8 桁の通し番号である (2001 年 1 月末現在 'HDSA00002480')。番号は遡ることはなく、データ取得を途中でキャンセルするなどした場合には欠番になる。ファイル名は、これに '.fits' をつけたもの (HDSA00002480.fits 等) になる。

3.1.2 FITS データの特徴

取得される FITS データには、通常のヘッダ部、データ部に加え、アスキー拡張テーブル (これもヘッダ部、データ部に分けられる) が添付される。テーブルには、取得されたスペクトルのフォーマット (回折次数、波長、CCD 上での位置) が記録される (いずれもグレーティング等の設定からの計算値)。3.3 節にヘッダ部およびテーブルの例を示す。

また、光量モニタを用いた場合には、二つめのアスキー拡張テーブルが添付され、そこに光量のデータが記入される。

3.1.3 データ形式の特徴

データ部は、分散方向 4100 ピクセル、スリット方向 2048 ピクセルのデータ (ビンニング無しの場合) に加えて、オーバースキャン領域がつけられている。オーバースキャンとは、光のあたった部分のデータ読みだしに加えて余分に読みだしを行うことで、そのデータを取得した際のバイアスレベルを記録できる。

データの読みだしは、それぞれの CCD について 2ヶ所ずつで読みだしているため、データとしては 4100×1024 ピクセルがひとつのユニットとなる。これにそれぞれオーバースキャン領域が 50 列 (4100×50 ピクセル) つけられる。これにより、図 3.1 のようなデータが得られることになる。なお、以上ではビン

ニング無しの場合のデータ形式について説明したが、ビンニングを行った場合でも、オーバースキャン領域は 50 列ずつつけられる。

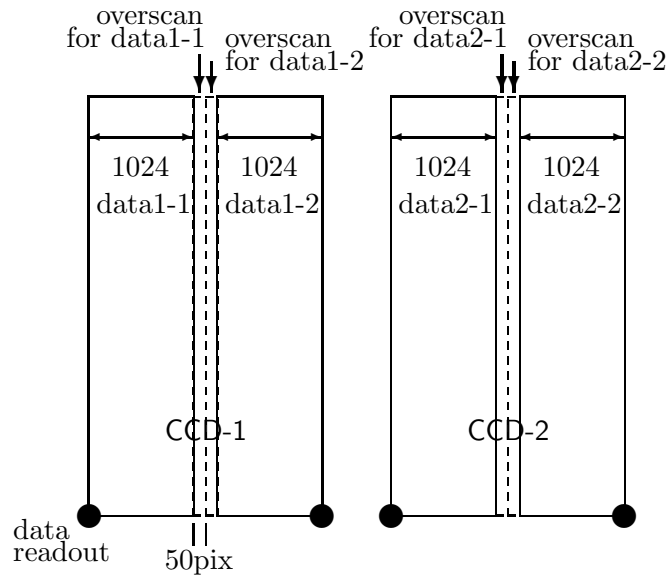


図 3.1: CCD データ形式の概念図。縦がスペクトル分散方向、横がスリット方向

HDS の場合、バイアスレベルの変動がある程度存在するため、データ整約の際には、オーバースキャン領域のデータを用いて変動分を補正することがのぞましい。整約の行い方については、以下に説明する。

3.2 HDS データに特有なデータ処理

3.2.1 アスキー拡張テーブルの処理

IRAF によってデータ进行处理する場合、アスキー拡張テーブルがついていることにより、FITS ファイル名を指定しただけでは直接には処理できない。これは FITS ファイルを読み込むタスク `rfits` によって処理可能なファイルにできる。

(例) `rfits input.fits 0 output.fits`

また、ファイル名に `[0]` をつければ (`HDSA00000001.fits[0]` 等) 直接処理することができる。

3.2.2 オーバースキャン領域の処理

3.1.3 節で説明したように、HDS のデータにはオーバースキャン領域が付けられている。これは以下のような手順によって有効に処理できる。なお、バイアスレベルの変動が無視できると考えるならば、

オーバースキャン領域を切り捨ててしまうこともできる。

- 各読みだし口に対応するオーバースキャン領域 ($50 \times 4100\text{pix}$) の平均をとる。
- 各読みだし口ごとに、データから、上で計算したオーバースキャン領域の平均値を差し引く。
- 各読みだし口に対応するデータごとに、それぞれのゲインをかける。ゲインの値は表 3.2.2 のとおり。
- データ領域だけ切りだし、各 CCD ごとにひとつのファイルになるようにくつなげる (オーバースキャン領域のない $2048 \times 4100\text{pix}$ のデータになる)。

以下に、読みだし口ごとの CCD ゲインの値を示す。なお、この値は、FITS ヘッダにも記載されている (長波長側: H_GAIN1、短波長側: H_GAIN2)。

表 3.1: CCD ゲイン

読みだし口	ゲイン (e^-/ADU)
CCD1, 左側 (長波長側)	1.628
CCD1, 右側 (短波長側)	1.615
CCD2, 左側 (長波長側)	1.782
CCD2, 右側 (短波長側)	1.665

この手順で処理を行う IRAF のスクリプト `overscan.cl` が、以下の URL から取得できる:

http://optik2.mtk.nao.ac.jp/HDS/index_J.html

使用方法は、作業を行っているディレクトリに `overscan.cl` ファイルをおき、

```
cl>task overscan=overscan.cl
```

とタスクの定義を行ったうえで、以下のように実行すればよい。

```
cl>overscan input.fits output.fits
```

以下の処理は通常のエシエルスペクトルデータの処理と同様である。

3.3 FITS ヘッダ・テーブルの例

3.3.1 FITS ヘッダ

SIMPLE = T / Standard FITS format

```

BITPIX = 16 / Number of bits for each pixel
NAXIS = 2 / Number of axes in frame
NAXIS1 = 2148 / Number of pixels per row
NAXIS2 = 4100 / Number of rows
EXTEND = T / There is a standard extension 1 (ASCII table)
BSCALE = 1.00000 / Real = (fits pixel value)*BSCALE+BZERO
BZERO = 3.276700E+04 / Real = (fits pixel value)*BSCALE+BZERO
BUNIT = 'ADU' / Unit of original pixel value
BLANK = 0 / Value used for NULL pixels
DISPAXIS= 2 / Main dispersion axis in frame
CTYPE1 = 'pixel' / Pixel coordinate system
CTYPE2 = 'pixel' / Pixel coordinate system
CUNIT1 = 'pixel' / Units used in both CRVAL1 and CDELTA1
CUNIT2 = 'pixel' / Units used in both CRVAL2 and CDELTA2
CRPIX1 = 1 / Reference pixel in axis1
CRVAL1 = 1 / Physical value of the reference pixel
CDELTA1 = 1 / Size projected into a detector pixel in axis1
CRPIX2 = 1 / Reference pixel in axis2
CRVAL2 = 1 / Physical value of the reference pixel
CDELTA2 = 1 / Size projected into a detector pixel in axis2
PROJP1 = 0.0 / Projection type of the first axis
PROJP2 = 0.0 / Projection type of the second axis
PC001001= 1.00000000 / Pixel Coordinate translation matrix
PC001002= 0.00000000 / Pixel Coordinate translation matrix
PC002001= 0.00000000 / Pixel Coordinate translation matrix
PC002002= 1.00000000 / Pixel Coordinate translation matrix
BIN-FCT1= 1 / Binning factor in axis1
BIN-FCT2= 1 / Binning factor in axis2
N2XIS = 2 / Number of axes for the slit projection
N2XIS1 = 2148 / Number of pixels per row for slit spectroscopy
N2XIS2 = 4100 / Number of scan lines for slit projection
C2YPE1 = 'DEC--TAN' / Type of projection used for #1 axis in 2nd WCS
C2PIX1 = 1024.0 / Reference pixel in X
C2VAL1 = 0.00 / Physical value of ref pix X for WCS
C2ELT1 = 0.00000 / Size projected into a detector pixel X
C2NIT1 = 'degree' / for C2VAL1 and C2ELT1
C2YPE2 = 'WAVELENGTH' / Type of projection used for #2 axis in 2nd WCS
C2PIX2 = 2048.0 / Reference pixel in Y
C2VAL2 = 701.22 / Physical value of ref pix Y for WCS
C2ELT2 = 0.00207 / Size projected into a detector pixel Y
C2NIT2 = 'nm' / for C2VAL2 and C2ELT2
P20JP1 = 0.0 / Projection type of the first axis
P20JP2 = 0.0 / Projection type of the second axis
P2001001= 1.00000000 / Pixel coordinate translation matrix
P2001002= 0.00000000 / Pixel coordinate translation matrix
P2002001= 0.00000000 / Pixel coordinate translation matrix
P2002002= 1.00000000 / Pixel coordinate translation matrix
PRD-MIN1= 1 / Start X position of partially read out
PRD-MIN2= 1 / Start Y position of partially read out
PRD-RNG1= 2148 / X range of the partially read out
PRD-RNG2= 4100 / Y range of the partially read out
OBJECT = 'CS22892-052' / Target Description
DATA-TYP= ' ' / Characteristics of this data
RA = '18:54:46.968' / RA of the tracked pos. on the slit guide pos.
DEC = '+05:00:23.70' / Dec of the tracked pos. on the slit guide pos.
RADECSYS= 'FK5' / The equatorial coordinate system

```

```

EQUINOX =          1950.0 / Standard FK5 (years)
RA2000  = '18:57:14.975' / Right accention (HH.MM.SS.SSS)
DEC2000 = '+05:04:26.24' / Declination (+/-HH:MM:SS.SS)
PROP-ID = 'o99007 '      / Proposal ID
OBSERVER= ' Aoki '       / Name(s) of observer(s)
OBS-MOD = ' SPEC_Multi-order ' / SINGLE-ORDER, MULTIPLE-ORDER
DATE-OBS= '2000-06-13'   / Date of observation
EXPTIME =          1.0 / Exposure time in second
UT       = '07:02:48.810' / Typical Universal Time during exposure
UT-STR   = '07:02:48.810' / UTC at start of exposure
UT-END   = '07:02:48.810' / UTC at end of exposure
HST      = '21:02:48.810' / Typical Hawaii Standard Time during exposure
HST-STR  = '21:02:48.810' / HST at start of exposure
HST-END  = '21:02:48.810' / HST at end of exposure
LST      = '14:08:31.331' / Typical Local SideReal Time during exposure
LST-STR  = '14:08:31.331' / LST at start of exposure
LST-END  = '14:08:31.331' / LSR at end of exposure
TIMESYS = 'UTC '        / Time System
MJD      =          51708.29362640 / Modified Julian Day
MJD-STR  =          51708.29362640 / MJD at start of exposure
MJD-END  =          51708.29362640 / MJD at end of exposure
SECZ     =          4.175 / typical sec(Zemith Distance) during exposure
SECZ-STR =          4.175 / secZ at start of exposure
SECZ-END =          4.175 / secZ at end of exposure
AIRMASS  =          4.1150 / Typical air mass during exposure
AIRM-STR =          4.1150 / Air mass at start of exposure
AIRM-END =          4.1150 / Air mass at end of exposure
ALTITUDE =          13.85753 / Altitude of the telescope pointing (degree)
ALT-STR  =          13.85753 / Altitude at start of exposure
ALT-END  =          13.85753 / Altitude at end of exposure
AZIMUTH  =          89.61928 / Azimuth of the telescope pointing (degree)
AZ-STR   =          89.61928 / Azimuth at start of exposure
AZ-END   =          89.61928 / Azimuth at end of exposure
OBSERVAT= 'NAOJ '       / Observatory
TELESCOP= 'SUBARU '     / Telescope
OBS-ALOC= 'Standby '    / Allocation mode (OBSERVATION/STAND-BY)
TELCOCUS= 'NASMYTH-OPT' / Focus where beam is reachable
FOC-POS  = 'NASMYTH-OPT' / Focus where instrument attached
FOC-VAL  =          -0.025 / Focus position of the telescope
FOC-LEN  =          104207.0 / Focal length of the telescope (mm)
F-RATIO  =          12.71 / F-ratio of incident beam
INSTRUME= 'HDS '        / Name of instrument
FRAMEID  = 'HDSA06130003' / Frame ID number issued by OBS
EXP-ID   = 'UNKNOWN '   / Exposure ID number locally defined
DATASET  = '# '         / ID of observation dataset
DISPERSR= 'echelle '    / Identifier of the disperser used
WAVELEN  =          701.22 / Center wavelength of the center order (nm)
WAV-MAX  =          759.04 / Maximum wavelength recorded (nm)
WAV-MIN  =          637.03 / Minimum wavelength recorded (nm)
SLTCPIX1 =          999.00 / Pixel of slit center (Axis1)
SLTCPIX2 =          2048.0 / Pixel of slit center (Axis2)
FILTER01 = 'UNKOWN '    / Filter wheel No.1
FILTER02 = 'UNKOWN '    / Filter wheel No.2
SLIT     = 'SHORT '     / Identifier of the entrance slit used (SHORT/LON)
SLT-WID  =          0.100 / Slit width (mm)
SLT-LEN  =          1.000 / Slit length (mm)

```

```

SLT-PA = 0.00 / Slit position angle (degree)
SLT-PSTR= 0.0 / Slit position angle at start (degree)
SLT-PEND= 0.00 / Slit position angle at end (degree)
SLT-OBJP= 0.00 / Object position on the slit (arcsec)
DET-ID = 1 / ID number of the CCD in the detector unit
DETECTOR= 'EEV' , / Detector used to take this frame
DETPXSZ1= 0.0135 / pixel size in axis1 (mm)
DETPXSZ2= 0.0135 / pixel size in axis2 (mm)
DET-A01 = 0.000 / Rotation angle of the 1st detector (degree)
DET-A02 = 0.000 / Rotation angle of the 2nd detector (degree)
GAIN = 1.70 / Readout gain
DET-TMP = 0.0 / Nominal detector temperature (Kelvin)
DET-TAVE= 0.0 / Average detector temperature (Kelvin)
DET-TMAX= 0.0 / Maximum detector temperature (Kelvin)
DET-TMIN= 0.0 / Minimum detector temperature (Kelvin)
DET-TSD = 0.00 / Detector temperature fluctuation (Kelvin)
WEATHER = 'Clear' , / Weather condition
SEEING = 0.000 / FWHM of the star observed with Slit Viewer (arc
NAS-TAVE= 0.00 / Average Nasmyth encl. temp. (Kelvin)
DOM-WND = 0.1 / Wind speed inside dome (m/s)
DOM-TMP = 277.95 / Atmospheric temperature inside dome (Kelvin)
DOM-HUM = 33.0 / Humidity inside dome (hPa)
DOM-PRS = 622.9 / Nominal atmospheric pressure in dome (hPa)
OUT-WND = 4.4 / Wind speed outside dome (m/s)
OUT-TMP = 280.85 / Atmospheric temperature outside dome (Kelvin)
OUT-HUM = 14.5 / Humidity outside dome (hPa)
OUT-PRS = 622.9 / Atmospheric pressure outside dome (hPa)
IMR-TYPE= 'NONE' , / Image Rotator (BLUE, RED, NONE)
IMGROT = -152.89 / IMR position during exposure (degree)
IMR-STR = -152.89 / IMR position angle at start (degree)
IMR-END = -152.89 / IMR position angle at end (degree)
ADC-TYPE= 'BLUE' , / Atm. Disp. Compensator (BLUE,RED,NONE)
ADC = 0.00 / ADC position during exposure (degree)
ADC-STR = 0.00 / ADC position angle at start (degree)
ADC-END = 0.00 / ADC position angle at end (degree)
DAQ-VER = '1.0.0' , / Data Aquisition System
INS-VER = 'HDS-1.00/HDS-1.00' / hardware/software version
COMMENT revised on 1 Nov. 1999 by W. Aoki
COMMENT by H.Izumiura, S. Kawanomoto, W. Aoki.
COMMENT Keywords specific to HDS
COMMENT
COMMENT /SLIT
H_S-INCL= 0.00 / Slit inclination angle wrt the horizontal plane
COMMENT /Detector
H_D-UNIT= '1' , / ID number of the detector unit
H_D-OTHR= 'YES' , / Use of the other CCD in this mosaic
COMMENT /SHUTTERS
H_SHUTTR= 'OPEN' , / Entrance shutter (OPEN, CLOSE)
H_HARTMN= 'ALL-OPEN' / Hartmann shutter (U-OPEN,L-OPEN,ALL-OPEN,ALL-CL
COMMENT /COLLIMATOR MIRROR
H_COLLIM= 'RED' , / Collimator (BLUE, RED)
H_CLPSTN= 0.00 / Collimator position (mm)
H_CLFOCL= 3396.51 / Collimator focal length (mm)
COMMENT /ECHELLE GRATING
H_ECONST= 31.60 / Ruling pitch (grooves/mm)
H_EBLAZE= 70.30 / Blaze Angle (degree)

```

```

H_EEPSRN=                6.00 / Offset Angle of the Incident Beam (degree)
H_EGAMMA=                0.00 / (degree)
H_EROTAN=                0.40000 / Echelle Rotation Angle (degree)
COMMENT /CROSS DISPERSER GRATING
H_CROSSD= 'RED          ' / Cross Disperser (BLUE, RED, MIRROR, NIR)
H_CCONST=                250.000 / Ruling pitch (grooves/mm)
H_CBLAZE=                5.000 / Blaze Angle (degree)
H_CEPSRN=                0.00 / Offset Angle at Blaze Wavelengths (degree)
H_CGAMMA=                45.00 / (degree)
H_CROTAN=                5.00000 / Cross Disperser Rotation Angle (degree)
COMMENT /CAMERA
H_CMRFL =                770.85 / Camera focal length (mm)
COMMENT /Detector Focusing Unit
H_FOCUS =                0.00000 / Focusing unit position (mm)
H_PITCH =                0.00000 / Focusing unit pitching angle (degree)
H_YAWING=                0.00000 / Focusing unit yawing angle (degree)
H_DETROT=               -1.00000 / Rotation angle of the detector unit (degree)
COMMENT /I2Cell and Light Monitor
H_I2CELL= 'NOUSE        ' / I2 Cell Mode (USE/NOUSE)
H_LM      = 'NOUSE        '
H_I2TEMP=                0.0
H_LMINTG=                0.0
H_I2POS = 'UNKNOWN      '
H_LMPOS = 'UNKNOWN      '
I2CELL   = 'NOUSE        ' / I2 Cell Mode (USE/NOUSE)
H_ETMP1 =               -100.0 / Nasmyth Temperature 1 (Kelvin)
H_ETMP2 =               -100.0 / Nasmyth Temperature 2 (Kelvin)
H_SUPER = 'NONE          ' / Super Resolution Mode (POS1, POS2, NONE)
COMMENT /Auto Guider (offset guider)
H_AG-OBJ= '              '
H_AG-ORA= '              ' / RA of the guide object
H_AG-ODE= '              ' / Dec of the guide object
H_AG-RA = '              ' / RA of the tracked pos. on the slit guide pos.
H_AG-DEC= '              ' / Dec of the tracked pos. on the slit guide pos.
H_OSMIN1=                1025 / Start of overscan region for AXIS1
H_OSMAX1=                1124 / End of overscan region for AXIS1
H_OSMIN2=                 1 / Start of overscan region for AXIS2
H_OSMAX2=                4100 / End of overscan region for AXIS2
NAS-TMP =                 5.5
HISTORY  File modified by user 'hdsuser' with fv on 00-06-14T12:44:21
HISTORY  File modified by user 'hdsuser' with fv on 00-06-14T12:45:59

END

```

3.3.2 アスキー拡張テーブルのヘッダ

```

XTENSION= 'TABLE        ' / ASCII table extension
BITPIX   =                8 / 8-bit ASCII characters
NAXIS    =                2 / 2-dimensional ASCII table
NAXIS1   =                72 / width of table in characters
NAXIS2   =                15 / number of rows in table
PCOUNT   =                0 / no group parameters (required keyword)
GCOUNT   =                1 / one data group (required keyword)
TFIELDS  =                12 / number of fields in each row
TTYPE1   = 'ORDER       ' / label for field 1

```

```

TBCOL1 = 1 / beginning column of field 1
TFORM1 = 'I3' / Fortran-77 format of field
TUNIT1 = ' ' / physical unit of field
TTYPER2 = 'X-MIN' / label for field 2
TBCOL2 = 5 / beginning column of field 2
TFORM2 = 'I4' / Fortran-77 format of field
TUNIT2 = 'PIXEL' / physical unit of field
TTYPER3 = 'Y-MIN' / label for field 3
TBCOL3 = 10 / beginning column of field 3
TFORM3 = 'I4' / Fortran-77 format of field
TUNIT3 = 'PIXEL' / physical unit of field
TTYPER4 = 'WL-MIN' / label for field 4
TBCOL4 = 15 / beginning column of field 4
TFORM4 = 'F8.3' / Fortran-77 format of field
TUNIT4 = 'nm' / physical unit of field
TTYPER5 = 'X-CEN' / label for field 5
TBCOL5 = 24 / beginning column of field 5
TFORM5 = 'I4' / Fortran-77 format of field
TUNIT5 = 'PIXEL' / physical unit of field
TTYPER6 = 'Y-CEN' / label for field 6
TBCOL6 = 29 / beginning column of field 6
TFORM6 = 'I4' / Fortran-77 format of field
TUNIT6 = 'PIXEL' / physical unit of field
TTYPER7 = 'WL-CEN' / label for field 7
TBCOL7 = 34 / beginning column of field 7
TFORM7 = 'F8.3' / Fortran-77 format of field
TUNIT7 = 'nm' / physical unit of field
TTYPER8 = 'X-MAX' / label for field 8
TBCOL8 = 43 / beginning column of field 8
TFORM8 = 'I4' / Fortran-77 format of field
TUNIT8 = 'PIXEL' / physical unit of field
TTYPER9 = 'Y-MAX' / label for field 9
TBCOL9 = 48 / beginning column of field 9
TFORM9 = 'I4' / Fortran-77 format of field
TUNIT9 = 'PIXEL' / physical unit of field
TTYPER10 = 'WL-MAX' / label for field 10
TBCOL10 = 53 / beginning column of field 10
TFORM10 = 'F8.3' / Fortran-77 format of field
TUNIT10 = 'nm' / physical unit of field
TTYPER11 = 'SLIT INCLINATION' / label for field 11
TBCOL11 = 62 / beginning column of field 11
TFORM11 = 'F5.3' / Fortran-77 format of field
TUNIT11 = 'degree' / physical unit of field
TTYPER12 = 'DISPERSION' / label for field 12
TBCOL12 = 68 / beginning column of field 12
TFORM12 = 'F5.3' / Fortran-77 format of field
TUNIT12 = 'nm/PIXEL' / physical unit of field
EXTNAME = 'HDS_ASCII' / name of this ASCII table extension

```

END

3.3.3 アスキー拡張テーブル

```
ORDER X-MIN Y-MIN WL-MIN X-CEN Y-CEN WL-CEN X-MAX Y-MAX WL-MAX SLIT INCLINATION DISPERSION
```

I3	I4	I4	F8.3	I4	I4	F8.3	I4	I4	F8.3	F5.3	F5.3
	PIXEL	PIXEL	nm	PIXEL	PIXEL	nm	PIXEL	PIXEL	nm	degree	nm/PIXEL
79	78	4096	749.916	196	2048	754.479	313	1	759.041	0.000	0.002
80	221	4096	740.542	338	2048	745.048	455	1	749.553	0.000	0.002
81	361	4096	731.400	477	2048	735.850	592	1	740.300	0.000	0.002
82	497	4096	722.480	612	2048	726.876	727	1	731.272	0.000	0.002
83	630	4096	713.776	744	2048	718.119	858	1	722.461	0.000	0.002
84	760	4096	705.279	873	2048	709.569	986	1	713.860	0.000	0.002
85	886	4096	696.981	999	2048	701.222	1111	1	705.462	0.000	0.002
86	1010	4096	688.877	1122	2048	693.068	1234	1	697.259	0.000	0.002
87	1131	4096	680.959	1242	2048	685.102	1353	1	689.245	0.000	0.002
88	1249	4096	673.220	1359	2048	677.316	1470	1	681.412	0.000	0.002
89	1364	4096	665.656	1474	2048	669.706	1584	1	673.756	0.000	0.002
90	1477	4096	658.260	1586	2048	662.265	1695	1	666.270	0.000	0.002
91	1588	4096	651.026	1696	2048	654.987	1804	1	658.948	0.000	0.002
92	1696	4096	643.950	1803	2048	647.868	1911	1	651.786	0.000	0.002
93	1801	4096	637.026	1908	2048	640.901	2015	1	644.777	0.000	0.002