COMICS DATA REDUCTION MANUAL Ver.1.0β

Yoshiko K. Okamoto
Mitsuhiko Honda
Yoko Okada

平成 16 年 11 月 13 日

目 次

第 1 章 INTRODUCTION OF COMICS **5**

1.1 Mid-Infrared Astronomy 5

1.2 装置概要 5

第 2 章 COMICS Data Set **7**

2.1 'chop and nod' と生データの構成 7

2.2 解析の流れ 10

第 3 章 FITS FILE AND HEADER **14**

3.1 1-8 行目 14

3.2 すばる共通ヘッダ 15

3.2.1 望遠鏡に関するパラメータ 15

3.2.2 光学系のセッティングに関するパラメータ 15

3.3 COMICS 固有ヘッダ 16

第 4 章 一次解析の方法: 手順 / コマンド 一覧 **18**

4.1 撮像の解析: 方法まとめ 19

4.2 分光の解析: 方法まとめ 20

4.3 ログダイジェストの例 21

第 5 章 一次解析の方法: 詳説 **24**

5.1 下準備: 元データの統一化と情報の整理 24

5.1.1 頻出 FITS HEADER 一覧の作成 24

5.1.2 ECO 画像について 24

5.2 撮像 (Nimg, Qimg) の解析 25

5.2.1 ダーク 25

5.2.2 フラットの作成 26

5.2.3 バッドピクセルのリストアップ 27

5.2.4 天体、標準星の解析 28

5.3 分光 (NL, QM) の解析 33

5.3.1 ダーク 33

5.3.2 読みだしパターン ノイズの低減 33

5.3.3 フラットの作成 33

5.3.4 バッドピクセルのリストアップ 35

5.3.5 天体、標準星の解析 35

5.3.6 天体のスペクトルを求める 40

5.4 考えられる質問など 44

5.4.1 ozone at 9.6μm の評価 44

5.4.2 Nodding はしなくてもいいのですか? 44

5.4.3 N 低分散分光でゴーストがあるんですが... 44

5.4.4 geotran で変換しようとするとエラーが出るのですが... 44

5.4.5 geomap 関連 44
5.4.6 q_startrace が時間がかかってしょうがない 44

表 目 次

1.1 COMICS の主な仕様 6

図 目 次

2.1 COMICS で得られるデータ (chop and nod) 8
2.2 COMICS で得られるデータ (データファイルの内容) 9
2.3 chop and nod データの差引 11
2.4 分光画像における波長、空間方向の決定 13

5.1 拡がった天体の位置合わせの手法 30
5.2 分光解析の流れ (低分散分光点源の例) 34
5.3 波長ピクセル関係 36
5.4 空間一定線とそのフィッティング結果の例 37
5.5 標準星からスペクトルを得る原理 41

第1章　INTRODUCTION OF COMICS

1.1　Mid-Infrared Astronomy

中間赤外線とは、波長が 5∼30μm 程度の赤外線である。中間赤外線域には 2 つの大気の窓があり、地上からの観測が可能であるが、高い背景放射による制限や検出器技術の問題から、最近まで観測が進んでいなかった。しかし、近年になって、量子効率の良い 2 次元アレイ検出器が登場し、さらに、大型光赤外線望遠鏡の建設が進んだこともあって、効率がよく分解能の高い中間赤外線観測が可能な段階になりつつある。このような状況のもと、すばる望遠鏡用の第一期装置の一つとして開発されたのが Cooled Mid-Infrared Camera and Spectrometer(COMICS) である。

中間赤外線は、いくつかの特徴的性質を持っている。まず、可視光に比べて透過力が高いため、埋もれた天体を観測するのに適している。一般的に、可視光で埋もれた天体については、近赤外線より長い波長での観測が行われるが、中間赤外線はシリケイトによる吸収があるものの、近赤外線よりもさらに透過力が高い。

第 2 に中間赤外線の波長 (∼5–30μm) は、黒体では 100–400K の放射のピークに相当し、この程度の温度の物質から効率的に放射される。それゆえ数百 K 程度の低温度の天体の観測に適している。このような天体としては星周のダスト、原始惑星系円盤、原始星などが考えられるが、これらの天体の観測的研究によって、たとえば晩期型星の進化や、星形成・惑星系形成の理解がすすむことが期待される。

第 3 に、中間赤外線の波長域には、多くのダストによる放射・吸収の feature が存在するため、ダストの物性を理解するのには中間赤外線による観測が重要である。たとえば 9.7μm、18μm 付近には、シリケイトによると考えられている feature がある。これは、前述の波長をピークとしてひろく中間赤外線全域にわたる形をしている。他に、未同定赤外線バンドとよばれる環状の炭素系固体物質によると考えられている feature が 6.2, 7.7, 8.65, 11.25, 12.8μm 付近をピークとした広い feature として様々な天体で観測されている。

1.2　装置概要

COMICS は、前節で述べた、中間赤外線で期待される天文学的な観測を可能にするための装置である。狙っている研究対象は、近傍・遠方銀河、星惑星系形成、星間ダスト、太陽系天体、など多岐にわたっている。機能としては、中間赤外線域での撮像と長スリット分光の両者を備えている。望遠鏡の放射を極力抑えるため、すばる望遠鏡のカセグレン焦点に設置する。すばる望遠鏡の口径をいかした高空間分解観測を実現するため、ピクセルスケールが ∼0.13”/pix (撮像の場合) に設計されている。分光モードでは、10μm 帯については、波長分解能が R∼250, 2500, 10000 の低分散、中分散、高分散モード、20μm 帯については、R∼2500, 5300 の中分散、高分散モードでの観測を行なうことができる。回折格子は、Q 高分散以外のモード用に 1 種類ずつ、計 4 つを用いる。検出器は、8∼28μm まで感度のあるアメリカ Hughes 社 Santa Barbara Research Center 製の、Si:As 320x240 BIB 型検出器を用いる。BIB 型検出器は、高い量子効率を持ち、検出限界と観測効率の向上には必須の検出器である。この検出器を、撮像モードでは 1 個を用いて、撮像観測を行う。撮像側の検出器は、分光モードではスリットビューワーとして機能し、スリットと天体の位置関係を正確に知ることができる。分光の場合、検出器を 5 個並べて用い、効率良くスペクトル像を得る。検出器を並べる際には検出器どうしの間にすきまがあいてしまうので、回折格子を少し回転することですきまに落ちていた波長の光を観測する。すき間のあけかたをうまくとって、回折格子の角度を 2 種類で、ある波長範囲の中を効率良くすき間なくカバーできるようにする。これによって、中分散モードでは回折格子角度 2 種類で大気の窓のほぼ全域をカバーできる。10μm 帯と 20μm 帯では、波長が 2 倍程度異なるため、またシーイングの変動も考えて、3 種類の幅を変えたスリットを用意している。COMICS の主な仕様を表 1.1 にまとめておく。

常温では 10μm に黒体放射のピークが来るため、中間赤外線を観測する装置は、装置自身を冷却することが必

	撮像	分光
ピクセルスケール	0.130”/pix	0.165”/pix
検出器	320x240 Si:As ×1	320x240 Si:As ×5
視野	42”×31”	ロングスリット、40”
観測波長	N:8.8–12.4μm (5 バンド) UIR8.6, 11.24, [ArIII], [SIV], [NeII] の narrow band Q:17.7–24.5μm (4 バンド)	N: 7.8–13.3μm Q: 16.7–20.7μm
波長分解能	R∼10–20 R∼60–70 (line 用)	N バンド：R∼250, 2500,10000 Q バンド：R∼2500, 5300
システム効率 (?)	50% 以上	30% 以上

システム効率は、大気・検出器の量子効率を除いた場合の 10μm での値

表 1.1: COMICS の主な仕様

要である。このため、COMICS は、光学系および光学部品を制御するための駆動部品をすべて真空容器内にいれ、冷凍機 2 台を用いて光学部品を 30K 以下まで冷却する。検出器部分は、暗電流をさげるためにさらに低温にする必要があり、独立に熱パスをつけて、4K 程度まで冷却する。

第2章　COMICS Data Set

COMICS による観測、および観測データの解析を行う上では、COMICS におけるデータ取得の方法とデータファイルの構成についてよく理解しておかねばならない。

2.1　'chop and nod' と生データの構成

COMICS の観測では、中間赤外線域の高い背景放射に対応して、高速読出を行うとともに、変動のはやい背景放射成分をうまく差し引くために、副鏡 chop (以下単に、chop) と主鏡 nod (以下単に、nod) を併用している。chop は、背景放射変動の高周波数成分を落とす目的で行われ、0.1 ~ 数 Hz 程度の周波数と、数 ~ 60" の振幅 (peak to peak) が用いられる。しかし、chop は副鏡をふることで行っており、chop による 2 ビーム間では厳密には、使う光学系の部分が微妙に違っており、そのビーム間の差し引き画像には低レベルの残存パターンが生じる (残存パターンのレベルは望遠鏡放射率等に依存すると思われるが、すばるの場合には UKIRT 等に比べると非常に低い)。このため、暗い天体の観測を行おうとするときには、この残存パターンが検出限界を悪化させてしまう。これを防ぐ目的で行うのが nod である。これは、目的天体とは少しずらした場所で、目的天体をとるのと同様の chop、差し引きを行って、同じ残存パターンを発生し、目的ビームでの差し引き画像からさらに差し引くことで残存パターンを除去するものである。このため、nod の周波数は比較的遅くて良く、通常は数分で 1 nod ペアをとる。nod を行うかどうかは、天体の明るさやサイエンスの内容によって判断する。

COMICS で得られる画像データは図 2.1 および図 2.1 に示すようになっている。基本的には図 2.1 に示すように、天体に対して少しずつ位置をずらして chop と nod を行い、検出器上の異なる位置に天体像を得る。chop は、各 nod ビームで行う。これによって、おおもとでは A~D の 4 枚で 1 組の画像データを読み出している。chop と nod の方向 / 振幅は目的天体によって選ぶ必要がある。例えば、diffuse cloud のないところにある点源に対しては、振幅は 10" 程度、方向は任意 (通常 chop に対する副鏡の安定性が高い方向が選ばれる) でよいが、広がった天体や、diffuse cloud 中の天体などでは、天体サイズや diffuse cloud のムラを考慮して最適のものを選ばねばならない。(ただしこの場合でも、副鏡の振幅や周波数には性能の限界があるし、また振幅が大きすぎたり、周波数の遅すぎる chop は、背景差し引きに意味をなさないので、注意を要する) これによって、たとえば広がった天体等では、検出器上は'chop and nod' による 4 ビームでの像のうち例えば、1 つないし 2 つしかのらないという設定もありうる。また、観測対象が点源の場合には、chop と nod を同一方向に行うことで全ビームでの天体像をスリット上にのせて分光することも可能である。たとえば暗めの標準星等では、そのようにして SN を上げることも可能である。

通常、A,B,C,D の各画像は図 2.1 に示すようにさらに複数の画像からなる。nod ビームの一方において、chop を n 回 (ChopNum は 2n) 繰り返した場合には、ビーム A での画像データは、まず $A_1 \sim A_n$ という n 回分の画像をもつ。さらに、A_1,A_2,....,A_n のそれぞれは、早い読みだしにともない、通常、複数 (m 回) の exposure (読みだし) 画像の、和 $(\Sigma_i A_j^i)$、もしくは、複数のままの生画像 $(A_j^1, A_j^2, A_j^3,....,A_j^m)$ からなっている (この exposure のレベルでは、exposure 複数回に先だって空読み exposure が入るが、これは画像としては残らないので、副鏡の復帰性能等を考える時以外は考慮する必要はない)。chop のもう一方のビーム C についても同様の構成になっており、こうして、ある nod ビームについて、2 つの chop ビームでの画像が階層構造をなして、1 つのデータファイルとして得られる。これが別 nod ビームについての 1 データファイル (B:$B_1 \sim B_n$, D:$D_1 \sim D_n$) と組になって、一つのきれいに解析可能なデータセットとなる。

この文書では以下のように各階層の画像の表記を定義する。

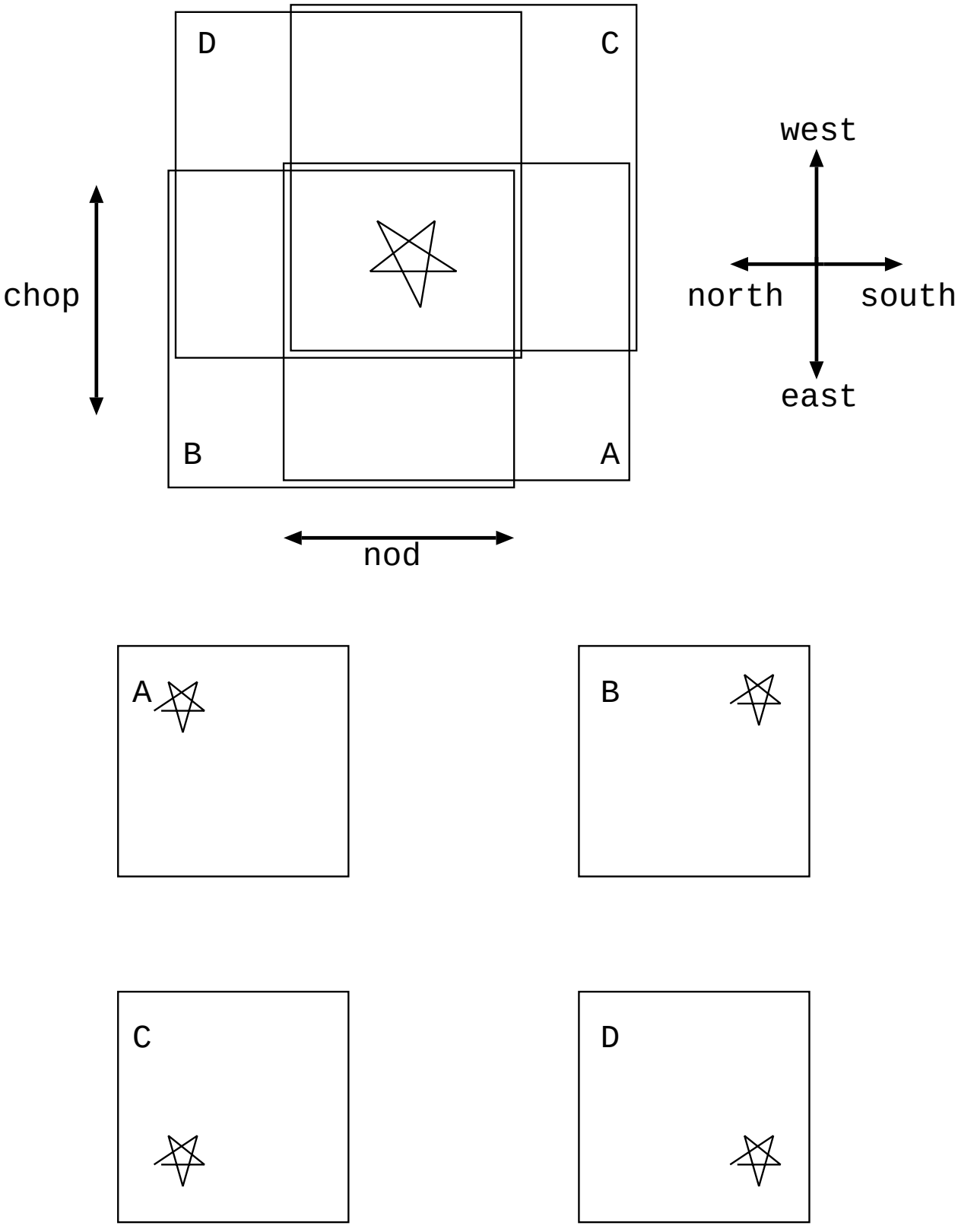

図 2.1: COMICS で得られるデータ：天体に対して少しずつ位置をずらして ‘chop andnod’ を行うことで、A∼D の 4 枚で 1 組の画像データが得られる。(chop,nod の方向は実際には任意。) A,B,C,D のそれぞれは図 2.1 に示すようにさらに複数の画像からなる。

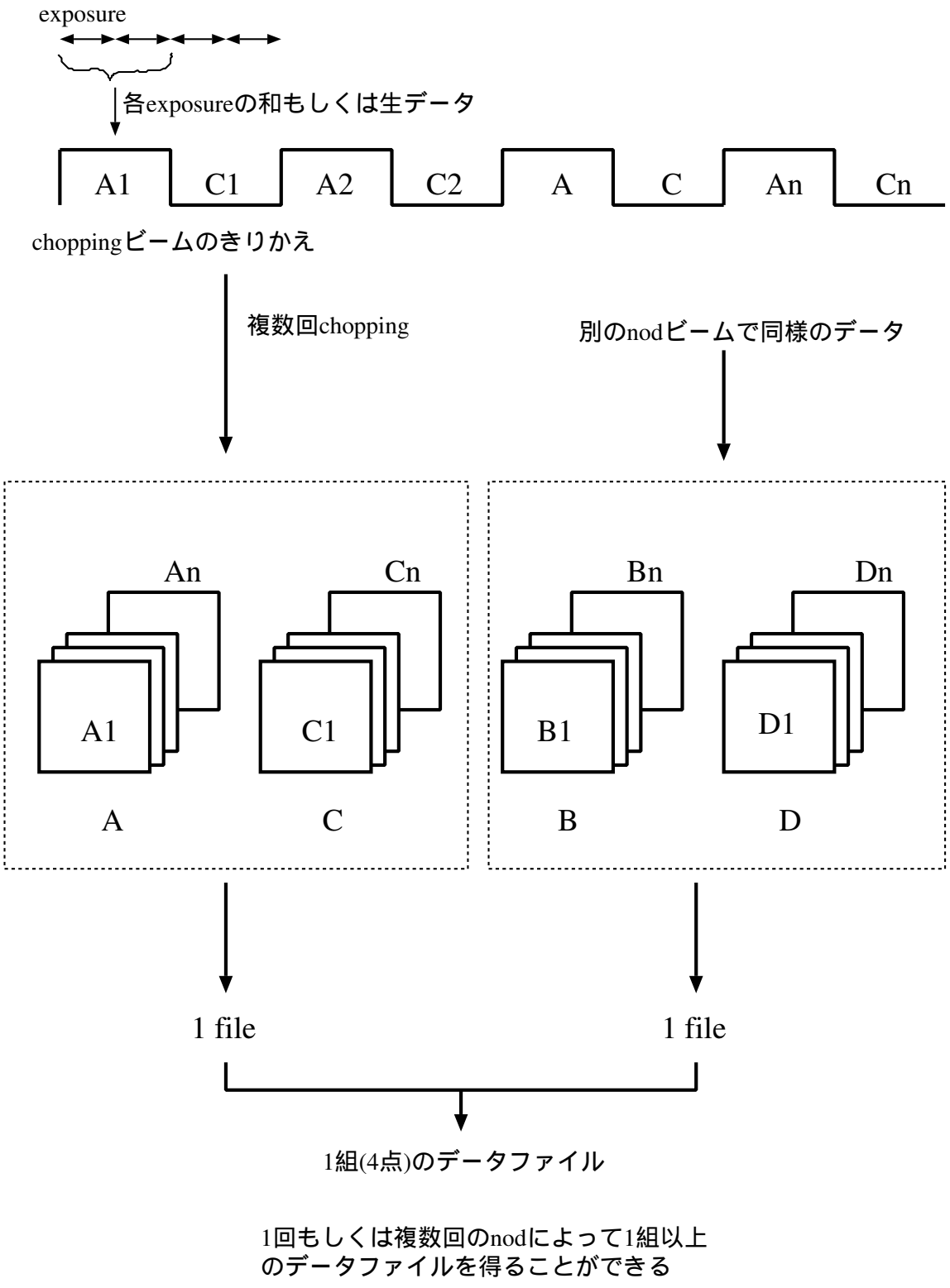

図 2.2: COMICS で得られるデータ：図 2.1 に示した、各 chop, nod ビームの画像は、通常、さらに複数の画像からなる。これは、各 nod ビームにおいて、複数回 chop をおこなうためである。各 chop ビームでの画像はさらに、複数回の読みだしに伴う複数枚の画像の和、もしくは生データになっている。

呼び方	対応	表記
nod beam	nod によるビーム位置が同じであるもの	A と C 内の全画像、等
chop beam	chop によるビーム位置が同じであるもの	A 内の全画像、等
beam	chop, nod による、天空上の位置が違うところでの画像に対応	A, B, C, D
file	取得された画像データの各 FITS ファイルに対応	A と C の組、B と D の組
frame	同一 nod beam 内での各 chop ごとの画像のまとまり	A 等の右下の添字
exposure	各読みだし	A 等の右上の添字

COMICS では、このうち、クロック変数 CoAdd で次の 3 種類のモードから選択して画像をとっている。

1) RAW モード (CoAdd=0):
全 exposure, 全 frame を残す。
各ファイル内の画像は、A_i^j, C_i^j

2) ADD モード (CoAdd=1):
同一 frame 内の exposure は全て足しあわせてしまい、全 frame を残す。
各ファイル内の画像は、$\Sigma_j A_i^j$, $\Sigma_j C_i^j$
通常の観測ではこれを採用している。

3) ECO モード (CoAdd=2):
同一 frame 内の exposure は全て足しあわせてしまい、さらに chop beam ごとに全 frame を足しあわせる。その結果、各 chop beam 1 枚の画像、合計 2 枚の画像しか残らない。
各ファイル内の画像は、$\Sigma_{i,j} A_i^j$, $\Sigma_{i,j} C_i^j$

なお、実際にはドームフラットの取得等で、chop, nod なしでデータを取得することもある。この場合には、Chop=0 になっているはずで、ChopNum パラメータで指定された数だけの frame が取得される。(各 frame 内で指定された数だけの exposure が行われる点は同じである) このモードでは、CoAdd=0 の時に全 exposure 画像が残され、CoAdd=1 のときには各 frame 内で全 exposure の足し合わせを行うので ChopNum 枚数分の画像が残される。CoAdd=2 のときには全画像が足し合わせられて結局 1 枚の画像が 1 ファイルの中に残ることになる。

2.2 解析の流れ

観測データを天文学的考察を行うための基礎情報のレベルまで解析することを一次解析と呼ぶ。この基礎情報からそれぞれの天文学的目的に基づいた解析、考察を行うことを二次解析と呼ぶことにする。この文書では一次解析の方法について述べる。詳しくは第 5 章で述べる。

ここでは解析の概略をつかむために、観測で得られたデータの解析のおおまかな流れについて述べる。

1.chop and nod データのさしひき　前述したように、観測天体についてはそれぞれ異なる場所に天体のうつっている 4 枚組の画像がとれている。これについてまず、同じ nod beam でとられた異 chop beam の画像の差引を行う (chop 差引)。すなわち、図 2.1 で、

$$(A_1 - C_1) + (A_2 - C_2) + \cdots\cdots + (A_n - C_n) = \alpha$$

$$(B_1 - D_1) + (B_2 - D_2) + \cdots\cdots + (B_n - D_n) = \beta$$

として、chop 差引をした 2 枚の画像 α, β を作る (図 2.2)。これによって、暗電流とともに、背景光の大部分は差し引けるが、光学系の異なる部分を使うことによる残存パターンがのる。そこで次にこうしてできた 2 枚の絵どうしのさしひきを行う (nod 差引)。すなわち、

$$\alpha - \beta = I$$

として、nod 差引をした画像 I を得る。この処理によって、天体以外の部分については、信号はノイズレベルまで下がる。複数回 nod している場合には、画像 I を複数作ることができる。

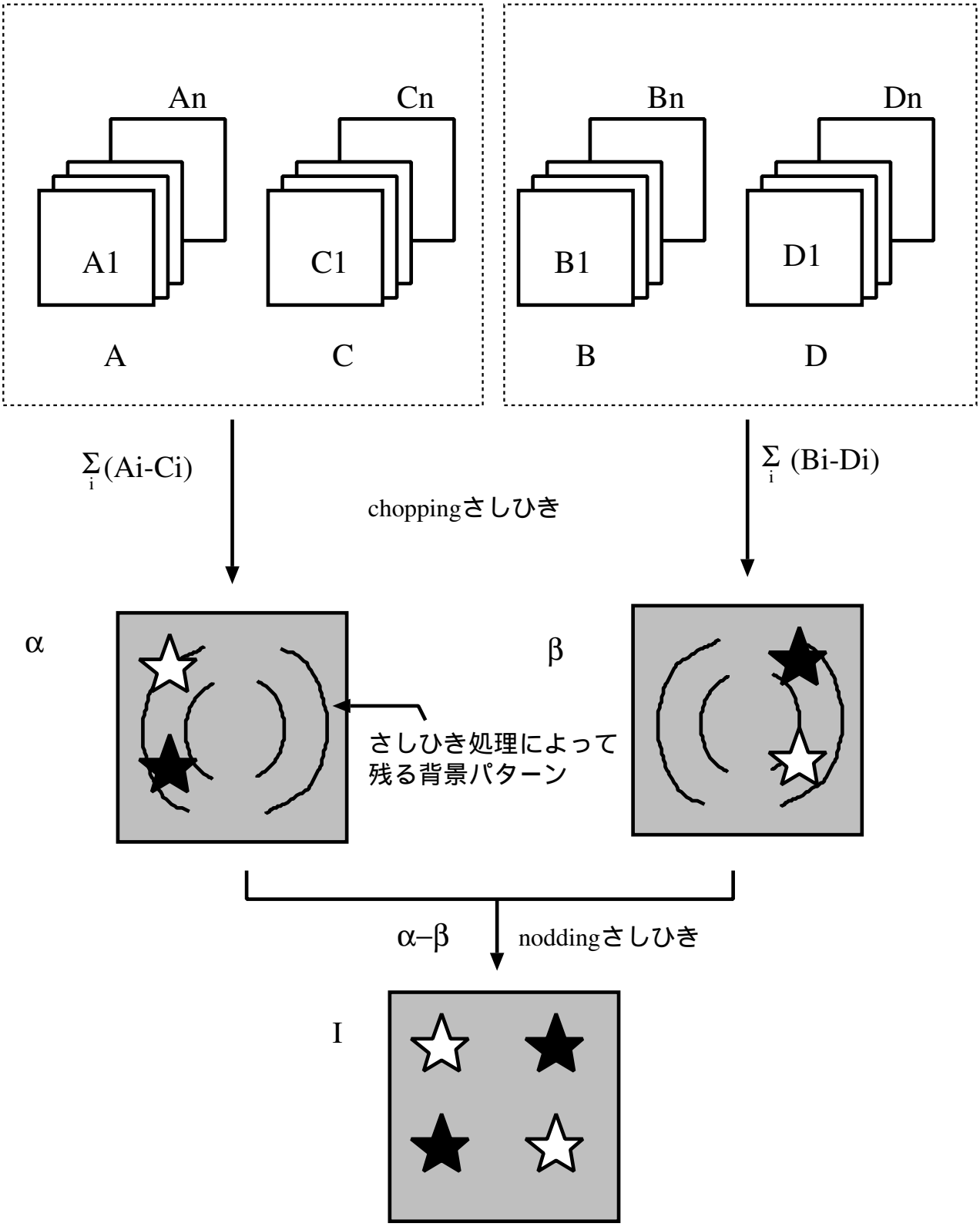

図 2.3: chop and nod データの差引 : 観測の結果得られた 4 枚 1 組の画像データを、まず、同 nod beam、異 chop beam の画像の差引を行う (A,C → α、B,D → β; chop 差引)。次に残存パターンを除去するために chop 差引でできた 2 枚の画像の差引を行う (α,β → I)。天体のうち、カウントが正で残る部分 (白) と負になって残る部分 (黒) がある。

2. フラット処理　chop 差引、nod 差引後の画像をフラットで割り感度ムラ補正をする。フラットには、ドームフラットとスカイフラットがあり、現在は主として撮像にスカイフラットを、分光にドームフラットを用いる。ドームフラットといっても特にランプ等を使用するのではなく、ドーム、ウインドスクリーン、ミラーカバー等の熱放射をそのまま利用する。

3. 画像変換 (ゆがみ補正) 、波長較正 (分光)　分光では、回折格子に対して光線をななめ入射させるため、スペクトルが検出器上で曲線を描くので、このゆがみの補正を行わねばならない。その上で波長較正を行う。

ゆがみの補正は以下のように行う (図 2.2)。まず、標準星等の点源天体を観測したスペクトル画像から、空間一定曲線を抽出する。これとは別に、同一ファイル内 (同一 nod beam 内) で全 chop beam の足し合わせや平均等をとり、スカイのスペクトル画像が求める。ここでスカイの輝線から、波長一定曲線を抽出する。そして空間軸、波長軸が直交するように画像変換を行う。スカイの画像からは、大気輝線を大気放射率モデルと比較・同定することで波長較正も行う。

4. 画像の足し合わせ　位置をずらして撮ったファイルはもちろん、同じ位置で長時間観測する場合でも、得られるファイルは多数になるため (1 ファイルに収められるデータ量に限りがあるため) 、ファイルを足し合わせる作業が必要である。また、同じ位置で撮ったつもりでも、1–数ピクセル動いていることもあるため、位置合わせも必要な場合がある。

5. 標準星による補正　観測天体と同様に解析した標準星によって、カウントを明るさに補正する。

中間赤外線域では、標準星が他波長ほど正確かつ広く整備されてはいない。最近、Cohen らが中心になって、IRAS/LRS 観測等をもとにかなり大きな標準星データを発表したのが最も大きなサンプルであろう。他に、UKIRT などが WEB 上で公開している標準星リストもあるが、これは 20 個ほどの非常に明るい天体に限られている。

Cohen らの論文では、N,Q バンドで数十 ~ 数百程度の波長分解能での各星の明るさが示されている。COMICS の分光観測はロングスリット分光であるので、特に拡散源の解析の際には、スリット効率の違いに注意する必要がある。また撮像観測では、フィルターセットごとの明るさは N バンドでは全く整備されていないといってよく (N バンドという広帯域での明るさの情報が一部公開されているが、そのような観測は、高背景放射のためにまずなされない) 、各フィルターでの星の明るさは、Cohen らの論文にあるスペクトルデータの積分をして求める。

ここで注意すべきことは、中間赤外線の場合には、エアマスもさることながら、雲の有無が大気吸収に大きく影響していることである。中間赤外線域の観測では空がもともとこの波長で非常に明るいために、多少雲が出て透過率が落ちた場合でも、スカイノイズ (背景放射の変動量) が増えるが、観測を継続できる場合がままある。このような場合には、同じエアマスでとった標準星でも、雲の有無によって大気吸収を補正し切れないことが起こる。標準星による補正は、なるべく標準星での割算後にスペクトルの連続波が大気吸収に似た形の凹凸を持たないということを確認しながら行わねばならない。

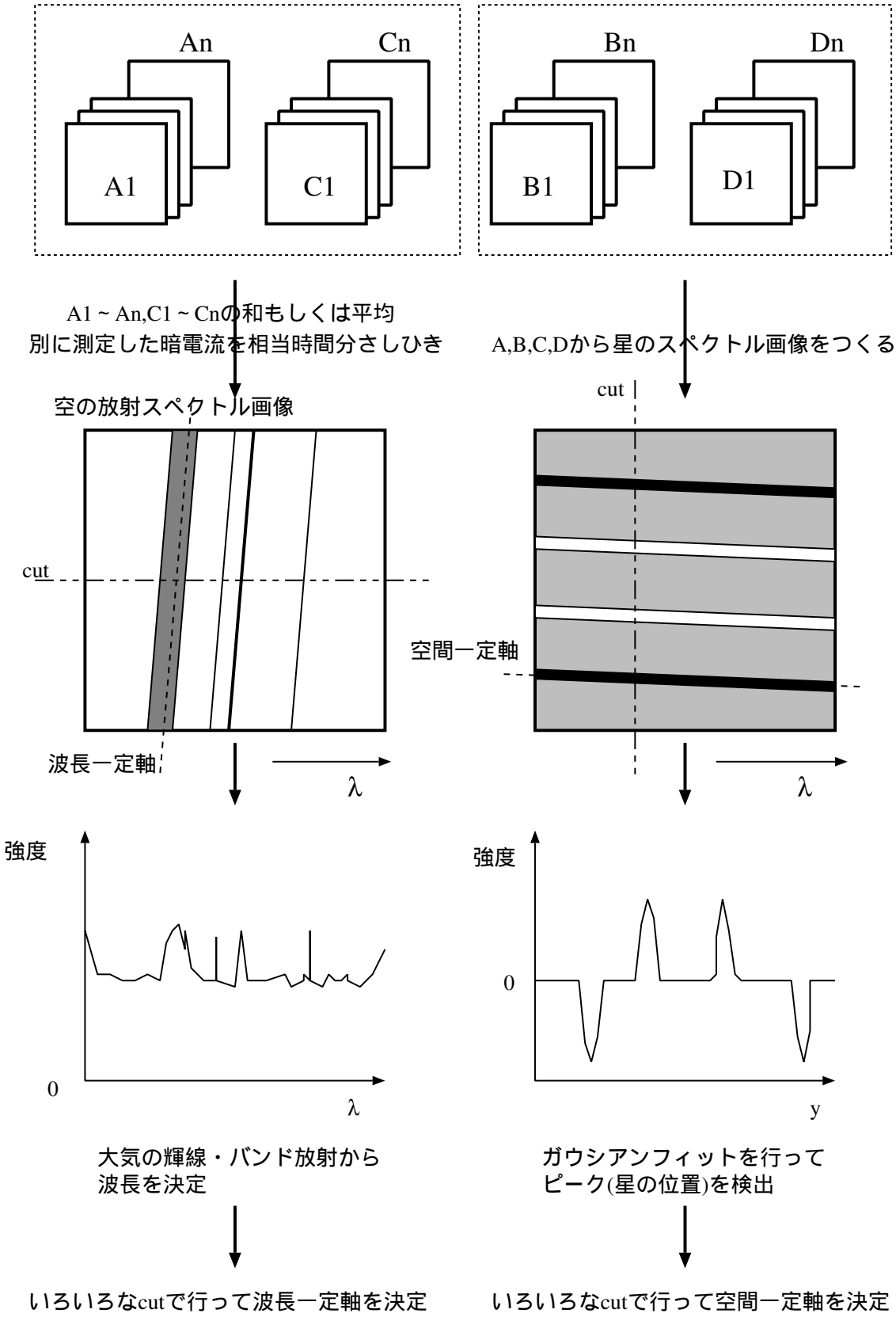

図 2.4: 分光画像における波長、空間方向の決定：波長一定軸については、生データを足し合わせて大気の放射スペクトル画像を作り、大気透過率モデルと比較することで波長同定を行う。空間一定軸については、星のスペクトル画像から、波長方向の検出器軸に沿った断面についてガウシアンフィットを行ってピークを検出して決定する。

第3章　FITS FILE AND HEADER

COMICS で取得した画像は、FITS ファイル形式にのって 2 系列が発生される。一つは、COMA で始まる画像ファイル群、もう一つは、COMQ で始まる画像ファイル群で、それぞれ、8 桁の画像番号が続く。現在のところ、COMA, COMQ とも、8 千万番台の画像ファイルは、実験データ関連のもので、通常観測データとは関連がない。

ここで、COMA ファイルは前記の CoAdd モード それぞれに応じて取得された生の画像で、COMQ ファイルは COMA ファイルをもとに、同一 chop beam の画像は和をとり、異なる chop beam の画像は差し引きをした (これはすなわち、on-beam の画像は + のまま、off-beam の画像は− をかけて、全 frame を足し合わせたものに相当する) chop 簡易処理済の画像である。

以下、COMICS で取得した画像ファイル (FITS 形式) のヘッダについて述べる。ヘッダはいろいろな変遷を経ており、バージョンは一番下の方の、Q_GETVER というパラメータで知ることができる。ヘッダの内容とバージョンの対応については、http://canadia.ir.isas.jaxa.jp/comics/internal/comics/private/fits_info/index.html にあり、公開も予定されているが、現在はパスワード 制限がかかっており、最新版ではない。

3.1　1-8 行目

```
SIMPLE  =                    T / Standard FITS format
BITPIX  =                   32 / # of bits per pixel
NAXIS   =                    4 / of axis in frame
NAXIS1  =                  320 / # of pixels/row
NAXIS2  =                  240 / # of pixels/row
NAXIS3  =                   50 / # of pixels/row
NAXIS4  =                    2 / # of pixels/row
EXTEND  =                    F / ASCII Extension Table
```

最初の 8 行は完全に FITS フォーマット規約にのっている。

ここで、BITPIX はデータのビット数を表し、ここに − のつくものは、浮動小数点数、つかないものは整数を示している。現在、COMA 画像、COMQ 画像ともに、BITPIX=32 である。COMICS の解析用ソフト q_シリーズを使って画像を解析すると、発生する新しい画像ファイルではすべて、BITPIX=−64 になる。(注 : 2 値化を行なう q_2val だけは例外で、整数型になるので後の処理には注意が必要)

NAXIS は、画像ファイルの次元数を表し、COMICS の場合には、検出器の x 軸 (NAXIS1)、y 軸 (NAXIS2)、時間軸 (複数 frame, exposure; NAXIS3) の 3 軸に加えて、検出器軸 (複数ある検出器に対応; NAXIS4) という 4 軸目が存在するので、NAXIS=4 になっている。言い替えれば、分光系で複数の検出器があって同時にスペクトル画像が取得されるが、それらはみな同じファイルに格納されることになる (ちなみに、撮像や低分散分光では検出器を 1 個しか使わないが、この場合にも NAXIS4=1 として、NAXIS=4 で扱われる)。

COMICS では 320x240 の検出器を使っているので、NAXIS1=320, NAXIS2=240 になっている。NAXIS3 の値は、そのときのクロック設定によって変動する。NAXIS4 の値は、撮像であれば 1、分光では観測モードによって値が変化する。

なお、分光と撮像では同時に画像を取得できるが、画像ファイルは連続する画像番号を持つ二つの別々のファイルとして生成される。通常は奇数・偶数と撮像・分光の対応は一定しているはずで、撮像の方が分光よりも 1 番だけ早い画像番号を持つ。撮像観測のみを行なっている場合は、対応する分光の画像番号のファイルはヘッダーのみのファイルとして生成される。

3.2 すばる共通ヘッダ

最初の基本ヘッダに続く

```
COMMENT = ' +++++++++++++++++++ SUBARU COMMON'
```

以降、観測装置固有ヘッダ (下記) までのヘッダは、すばる共通ヘッダである (FITS の手引 第 3.2 版等参照)。ここには、観測時刻、座標等の他、COMICS のフィルター、回折格子、レンズ等のセッティングが記述されている。

3.2.1 望遠鏡に関するパラメータ

望遠鏡に関するパラメータのうち、COMICS 観測で注意を要するのが以下のヘッダである。

```
INSROT  =              -72.158 / Instrument Rotator angle (deg)
INST-PA =                9.566 / Instrument Rotator P.A. (deg)
AUTOGUID= 'ON      '           / Auto Guider on/off
M2-TYPE = 'CS_IR   '           / Type of the Secondary Mirror (Opt/IR)
M2-TIP  = 'CHOPPING'           / 2nd Mirror tip-tilt on/off
M2-ANG1 =               -0.978 / 2nd Mirror Angle-1
M2-ANG2 =                0.687 / 2nd Mirror Angle-2
M2-POS1 =               -1.104 / 2nd Mirror Position-1
M2-POS2 =               -1.571 / 2nd Mirror Position-2
```

最初の二つは、インストゥルメント・ローテータの角度の情報で、特に INST-PA が天体に対するローテータ角度になる。AUTOGUID がオートガイダーを使っていたかどうか、で、使うことが多いが、曇っているときなど、可視光でのガイダー性能が中間赤外線での観測性能を劣化する場合には使用していないこともある。M2-で始まるキーワードが副鏡関連の情報で、特に、M2-ANG1, M2-ANG2, M2-POS1, M2-POS2 は副鏡 chop の振幅、角度の情報を持つべきところであるが、現在のところおそらくステータスをとった瞬間の副鏡の位置等を示しているようで、正しい設定値を示していないようである。

3.2.2 光学系のセッティングに関するパラメータ

まず座標関係をはじめとして多くの共通ヘッダーがたくさんあるが、特に座標関係は現在のところまったく正確なものを反映していないので (?) 使用しないこと。

```
COMMENT = ' ------------------------ COMICS Optics'
```

から、COMICS の光学系関係のヘッダーが続く。

```
OBS-MOD = 'spectroscopy                '   / Observation Mode
FILTER01= 'F01C10.50W6.00              '   / Filter name/ID (pre-opt filter-1)
FILTER02= 'H21                         '   / Filter name/ID (pre-opt filter-2)
FILTER03= 'F08C11.60W1.10              '   / Filter name/ID (img-opt filter)
FILTER04= 'L01L10I                     '   / Lens  name/ID (img-opt)
DISPERSR= 'G01L10L                     '   / Identifier of the disperser used
SLIT    = 'S02W160             '           / Identifier of the slit
SLT-LEN =               39.600 / Length of the slit used
SLT-PA  =                  0.0 / Slit Position Angle (degree)
SLT-WID =                0.330 / Width of the slit used
SLTCPIX1=                120.0 / Slit center projected on detector(pix)
SLTCPIX2=                160.0 / Slit center projected on detector(pix)
```

OBS-MOD は、観測モードで、撮像の画像ファイルであれば (slit viewer としての使用下でも) "imaging", 分光の撮像の画像ファイルであれば"spectroscopy"となる。

FILTER01, 02, 03, 04 はそれぞれ、使っている COMICS の前光学系フィルターの 1, 2、撮像系フィルター、レンズの名前が記入される。これらの名前で、最初の 1 文字はフィルター (F)、レンズ (L)、回折格子 (G) の別、続く 2 桁の数字が、各光学要素の ID 番号で、その後の文字列が光学要素の性質の記述である。例えばフィルターでは C.... というのが中心波長 (ミクロン単位) を、W.... というのが波長幅 (ミクロン単位) を示す (設計値のものもあるので、正しい値は別を参照のこと)。H??というのはフィルターホイールで素通しが選択されていることを示す (H の後の番号は穴位置の ID)。レンズでは、L10 (L20) は 10(20) ミクロン帯用、最後についている I(P) は、撮像用 (瞳撮像用) の意味。回折格子でも、L10,L20 はレンズと同じ意味で、最後についている L,M,H はそれぞれ低分散、中分散、高分散の各モードを示す。

SLIT は使用しているスリットの名前で (S がスリット、続く 2 桁が ID)。W... はスリットの幅 (ミクロン) を示す。160 ミクロンのスリット幅が分光の 2 ピクセル (0.33") に相当する。この幅は、SLT-WID に書かれている。S??W000 は、スリットの切られていないただのミラーを示し、これが選択されている場合には完全な撮像を行っている (分光系には光は入らない)。また、S??D... とある場合には、ピンホール直径を示している。SLT-LEN はスリット長で、これは画像のケラレがなければ一定。SLTCPIX1, SLTCPIX2 は COMICS では実際の厳密な設定は反映されていない。

さらに、以下のうち、WAV-MIN, WAV-MAX 等に本来ならばフィルター幅や観測波長を記すべきかもしれないが、現在は分光についてのみ、N バンド全域の値を書くということを行っている。また、EXPTIME は 1exp あたりの積分時間であって、全積分時間ではない。DET-TMP は、撮像・分光検出器の各マウントでの実測温度である。変換係数を示している GAIN の値は正しくない。

```
COMMENT = '         --- Spectroscopy only'
DISPAXIS=                    1 / Dispersion Axis  in frame
WAV-MIN =            7500.0000 / Shortest wavelen (nm)
WAV-MAX =           13500.0000 / Longest wavelen (nm)
WAVELEN =           10500.0000 / Central wavelen (nm)
COMMENT = ' ------------------------- COMICS Detector'
EXPTIME =                0.301 / 1 exposure integration time per exp(sec)
DET-TMP =                 7.65 / Detector temperature (K)
GAIN    =              350.000 / AD conversion factor (electron/ADU)
```

3.3 COMICS 固有ヘッダ

すばる共通ヘッダに続く

```
COMMENT = ' +++++++++++++++++++ COMICS ORIGINAL'
```

以降の"Q_"で始まるヘッダは、COMICS 固有ヘッダである。クロック、観測モード、窓等の情報はほとんどここに含まれている。データ解析する際にもっとも重要なのは、以下のクロックに関する情報である。

```
Q_DETST = '100110              '            / Detector Readout Status
Q_CLKFL = '/home/comics/cbin/clk/clkgen/012/c050.00150.001.00' / Macro File
Q_PIXTIM=                  150 / Clock duration for a pixel (0.1us)
Q_RRSTRT=                    1 / Reset Row Start Width (ND)
Q_CHWB  =                    3 / Wipe Exporsure Number in a Chop-beam
Q_CHEB  =                    2 / Exporsure Number in a Chop-beam
Q_CHCN  =                   50 / Chopping Number in this file
Q_CHAM  =                    1 / Add Mode 0:RAW 1:ADD 2:ECO
Q_CHOP  =                    1 / Chopping ON=1 OFF=0
```

```
Q_CTYPE =                    0 / Clock Type 0-9
Q_YSTRT =                    1 / Readout Region Y start
Q_1EXP  =                0.301 / Integration time per exp. (sec) = EXPTIME
Q_1FRAME=                0.603 / Integration time per frame(co-added) (sec)
```

Q_DETST は、どの検出器を読み出しているかという情報である。撮像用と分光用の 1–5 の合わせて 6 つに対し、読んでいるものを 1、読んでいないものを 0 で表わしてある。撮像観測の場合は 100000、N 低分散の場合は例えば 100110、Q 中分散の場合は 111111 などとなる。注意すべきは分光検出器の一部だけを使っている N 低分散などの場合で、100110 の例で言えば、検出器番号は分光用の 3 と 4 (片方はノイズ低減のための参照用) であるが、FITS ファイルの 4 次元目は (1,2) で表わされる。

Q_CLKFL は、クロックのマクロネームである。重要なクロック情報は、Q_PIXTIM (読みだしレート)、Q_RRSTRT (電子的 ND 量設定値)、Q_CHWB (各 frame 中の空読み回数)、Q_CHEB (各 frame 中のデータとして認識されている読みだし回数)、Q_CHCN (chop 回数× 2)、Q_CHAM (CoAdd モード)、Q_CHOP (chop しているかどうか)、Q_YSTRT (部分読みだしの読みだし開始の Y)、Q_1EXP (1exposure あたりに積分時間)、Q_1FRAME (1frame あたりの積分時間) である。

そして最後がチョッピングの状態を示すキーワードで、

```
COMMENT = ' ------------------------- CHOPPING'
Q_CHTHRW=                60.00 / Chopping Throw
Q_CHDEG =                53.34 / Chopping Degree
COMMENT = ' ------------------------- FITS VERSION'
Q_GETVER= '4.11              ' / FITS header VERSION
END
```

Q_CHTHRW がチョッピング振幅 (peak-to-peak, arcsec)、Q_CHDEG がチョッピングの position angle(Degree) である。

なお、Q_GETVER は FITS ヘッダのバージョンを示す (この節の冒頭参照)。

第 4 章　一次解析の方法: 手順 / コマンド一覧

以下に解析の手順一覧を示す。これは特に解析データに問題がない場合の手順であって、フラット精度の確認や、画像に系統的ノイズがのってしまった場合などには、さらにそのための処理を行う必要がある。

COMICS では、解析が他波長と異なる部分が多いこともあって、独自の解析プログラムをいくつか用意している。これは C 言語で書かれており、q_シリーズ解析プログラム (以下単に q_シリーズ) と呼んでいる。解析者は、このプログラムソースをそのまま使っても良いし、自らの環境や解析に合わせて書き換えることも可能だが、統一されたバージョン管理が COMICS グループまたは COMICS のサポートグループによってなされるであろう。注意点としては、装置立ち上げの時期から FITS ヘッダの記述に変遷があった関係で、q_シリーズの一部がまだ現在の FITS ファイルに対応していない。配布している q_シリーズの中で、デフォルトでコンパイルされないようになっているものは、未対応のプログラムである。また、一部 s_ から始まる s_シリーズもあるが、以下ではそれも含めて簡単に q_シリーズと呼ぶことにする。

q_シリーズは、大きく 2 つに分けることができる。一つは山頂で観測する際のごく簡単な簡易解析にも使うような、画像の加減乗除、column/row/time に沿った切り出し、領域の統計演算を行う、q_arith, q_list_stat などである。さらに、本解析時に使うことを目的とした、ヘッダのリスト作成、空間一定軸の検出、波長較正、を行う、q_headlst2, q_startrace, q_sky_nlow などがある。

ただし、q_シリーズでは扱っていない処理も多く、このような部分 (主に画像のゆがみ変換、シフト等の処理) は IRAF 等別のソフトウエアに通す (あるいは自分で解析プログラムを作成する) 必要があるが、現状では、q_シリーズ + IRAF で一通りの解析ができるはずである。q_シリーズの各コマンドの使い方は、コマンド名をコマンドラインから入力すれば出て来る。

以下に手順と対応コマンドの一覧を示しておく。各手順の内容については次章で詳しく説明する。

なお、解析するにあたっては、「 0. 下準備 」の段階で観測ログダイジェストのようなものを作成しておくと、後でデータの内容や解析すべきデータのリストがわかりやすくて良い。(FITS ヘッダにも情報が書かれているが、ヘッダは長く、また画像枚数が非常に多くなるので、このような手書きのログがあるほうが便利)

4.1 撮像の解析: 方法まとめ

0. 下準備	クロック、光学系等チェック	q_headlst2
1. ダーク作成	1exp あたりのダーク	q_list_stat, q_fcombine, q_arith
2. 撮像用フラットの作成	天体生画像 (スカイ) からダーク差し引き	*
(スカイフラット)	チョップビームごとに画像を分離	q_bsep
	frame 間統計処理、file 間統計処理	q_list_stat
	規格化	q_list_stat
3. マスク作成	デッドピクセルおよびゴミピクセルのチェック	q_badpix
4. 天体データ、	チョップ差し引き	COMQ 画像
標準星データの解析	(積分時間で割って単位時間あたりになおす	**)
	フラットで割る	q_arith
	shift & add	q_arith, q_fcombine, s_shift
		IRAF:imshift
	標準星のカウントをはかる	q_photo or IRAF:imexamine
	1 カウントあたりのフラックス値を求める	
	天体のフラットで割算済の画像に「1count	q_arith
	あたり flux 値」をかける	

* 機能としては q_subdark だが、ヘッダ未対応プログラム

** 機能としては q_unittime だが、ヘッダ未対応プログラム

4.2 分光の解析: 方法まとめ

0. 下準備	クロック、光学系等チェック	q_headlst2
1. ダーク作成	1exp あたりのダーク	q_list_stat, q_fcombine, q_arith
2. 読みだしパターン ノイズの低減	パターン参照検出器差引	s_subch
3. 分光用フラットの作成	(ドーム) − (ダーク) 作成	q_arith
	パターン参照検出器差引	s_subch
	規格化	q_list_stat
4. マスク作成	デッドピクセル、ゴミピクセルのチェック	q_badpix
5. 天体データ、 標準星データの解析	チョップ差引	COMQ 画像
	(積分時間で割って単位時間あたりになおす	**)
	フラットで割る	q_arith
(a) 変換用軸だし	天体、標準星のスカイスペクトルの作成	COMA 画像から作成
	1) (天体ないし標準星) − (ダーク)	*
	2) 複数枚画像になっている場合、平均化	q_list_stat
	3) フラットで割る	q_arith
	自動波長較正	q_sky_nlow(NL のみ)
	空間一定線検出	q_startrace
	(標準星スペクトル像で星のトレース)	
	軸だし	
	変換プログラム用対応表の作成	q_transtable2
(b) 変換	(a) の対応表に基づき変換を求める	IRAF: geomap
	天体、スカイ、マスクを変換	IRAF: geotran
(c) 波長および位置の較正	(b) の変換結果に自動波長較正	q_sky_nlow
	(b) の変換結果で空間一定線検出	q_startrace
	(標準星スペクトル像で星のトレース)	
	結果をまとめる (正しいか、やり直しか)	
(d) shift & add	スリットに沿って位置ずれのある 画像を足しあわせ	q_arith, q_fcombine, s_shift
6. 標準星による大気補正 (点源)	スペクトル一次元化	q_list_stat
	天体 / 標準星 × 標準星テンプレート	
	フラックス絶対値を求める	
6. 標準星による大気補正 (diffuse 天体)	標準星観測データと既知データの比から 装置の効率を含む大気スペクトルを求める	q_list_stat
	大気スペクトルを二次元画像化	q_mkimg
	天体を大気スペクトルの二次元画像で割る	q_arith
	天体データのデータキューブ化	q_list_stat
	フラックス絶対値を求める	

* 機能としては q_subdark だが、ヘッダ未対応プログラム

** 機能としては q_unittime だが、ヘッダ未対応プログラム

4.3 ログダイジェストの例

観測時のメモ (電子的にとれるものと、観測中の手書きメモ) は、解析に必要な情報は全部網羅しているものの、そのままでは見にくく、どれが有用なデータかわかりにくい。そこで、a2ps で 1-2 枚の出力になるくらいに、

- 天体名
- chopping パラメータの変更
- InstPA パラメータの変更
- 有用画像の番号
- 分光、撮像の別、各フィルター
- 望遠鏡の移動
- focus 合わせの実行

くらいを残し、左 10 文字程度見出し、右内容、で構成した簡単なファイルを作成する。ちゃんとしたログは別にあるので、ここでは、ためしに移動してとってみた画像などの番号は残さず、そういう場合には、移動量のみ個別に残してかいておく。

クロックの情報は、画像のヘッダに全て書かれており、q_シリーズを使えば自動的に単位時間あたりのカウントに直してくれるので、クロックパラメータ自体を書く必要はあまりないが、できれば同じクロックで取っている画像をまとめてリストするようにするのがよく、さらに、天体を載せてみただけ、のような画像はリストせず、解析に使うものだけをリストするのが分かりやすいだろう。

例

```
################################################################################
#                                                                              #
#                       2000/7/20   log digest : effictive version             #
#                                                                              #
#                OBJECTS:        G35.20                                        #
#                                K3-50A                                        #
#                STANDARDS:      HD161096                                      #
#                                HD189319                                      #
################################################################################
grating  回折格子を調整：4785 から 4790
         11290/91

focusAG  Z=-0.1102  seeing 1.2 arcsec
PA=0     InRo PA=0.0
ChopW=30 Chop 30 arcsec  direction 0.0
ChopD=0

================================================================================

標準星   HD161096(Standard)
         11306

         Ra -5.06  Dec 1.3
         11308

         11310--11313   分光
         11314/15   分光

         11316, 11318   撮像、しかし半月型に見えるのはなぜ？

================================================================================
focusAG  Z=-0.0061 ; seeing 0.8"
         status update
================================================================================

G35.20   つぎはキノコ G35.20 へ向ける

         11322  撮像、暗い
PA=-45   PA=-45deg
         11326    撮像
move     RA=-4.136 , Dec=-1.378
         11328    撮像

位置 1
move     Ra -1.5 Dec -1.5   分光での変なスジがのるのを嫌って移動
         11338--11353  分光
```

```
位置 2
move     Ra -0.424 Dec 0.424
         11354    撮像
         11356---11371  分光

位置 3
move     Ra -0.424 Dec 0.424
         11372---11387

位置 4
move     Ra -0.424 Dec 0.424
         11388--11403

focusAG  Z=0.1378

位置 5
         11406   再導入
move     Ra -1. Dec +1
move     Ra -1.5 Dec -1.5
         11408      撮像
         11410--11425   分光

位置 6
move     Ra 0.424 Dec -0.424
         11426--11441   分光

位置 7
move     Ra 0.424 Dec -0.424
         11442--11457   分光

位置 8
move     Ra 0.424 Dec -0.424
         11458   撮像
move     Ra 0.15 Dec -0.15
         11460--11475   分光

位置 9
move     右下のぼんやりしたものにスリットあてる試み; AG0 で移動
         Ra 0.184 Dec -6.434
chopD    Chop direction 160
         11476
         11478--11485

撮像
move     Ra -1.84 Dec 8.27
11.6um   11488--11493
8.7um    11494--11499
9.8um    11500--11505
12.5um   11506--11511

move     Ra 1.84 D 1.84
12.5um   11512--11517
8.7um    11518--11523
9.8um    11524--11529
11.6um   11530--11535
10.3um   11536--11541

最後のほうピントぼけてたかも
================================================================================

chopW    Chop 10" , P.A.=0
PA=0
focusAG  Z=0.2385 ; seeing 0.5

================================================================================

標準星   HD189319
10.3um   11546  撮像
10.3um   11548
12.5um   11550
8.7um    11552
9.8um    11554
11.6um   11556

move     RA -2.206 , Dec -0.368
         11558
         11564--11567   分光

move     RA -1.838 , Dec -1.838
         11570/11571   分光、ちょっとはずれ気味

move     RA 0.1838 , Dec 0.1838
         11572--11575   分光、ちょっとはずれ気味

PA=0     Instrument Rotator PA を-45 deg から 0 deg に
move     11576   天体再導入 (PA を変えたときにロストしたので)

move     RA -0.65  Dec -1.30
         11578--11581  撮像
```

```
         11584--11589  分光

================================================================================

K3-50A   K3-50A
         11590   撮像

chopW    Chop throw : 0"に  ???
move     RA -0.91 , Dec -2.34
         11592   撮像

         11594--11603   分光、  右下の星 166,133

move     RA -0.26 , Dec -0.91
         11604--11613   分光、  右下の星 158,131

move     RA= -0.389 , Dec 0  いまの PA=0
         11614--11623   分光、  右下の星 159,128

move     RA= -0.389 , Dec 0
         11624--11633   分光、  右下の星 159,125

move     RA= -0.389 , Dec 0
         11634--11643   分光、  右下の星 159,122

================================================================================
DomeFlat Wind Screen
         11646--11651 : dome : 50-1-24-0-1-100, 100-1-12-0-1
DARK     11652--11657 : dark : 50-1-24-0-1-100, 100-1-12-0-1
         11658--11663 : dark : 50-1-24-0-1-100, 400-1-3-0-1

================================================================================
```

第5章　一次解析の方法: 詳説

ここでは解析は UNIX もしくは Linux 上で行うことを想定している。用いるツールは、

- q_シリーズ
- s_シリーズ
- IRAF

であるが、足りないところは多少、自作プログラムなどで補う必要がある。

5.1　下準備: 元データの統一化と情報の整理

5.1.1　頻出 FITS HEADER 一覧の作成

解析途中で、各元画像の取得状態 (クロック、光学系、温度、望遠鏡の状態、温度など) を確かめるのに使いやすいように、各画像のファイル名と、ヘッダを一覧にしたファイルを、大分類ごとに作成。リストを作りたい画像ファイルをリスト (listfile) にして q_headlst2 を実行。たとえば、データのあるディレクトリが /data1/20000720A のとき、リストを作りたいディレクトリで

```
ls /data1/20000720A/COMA* | awk '{print substr($1,1,16),substr($1,18,12)}' > 720.lista
ls /data1/20000720A/COMQ* | awk '{print substr($1,1,16),substr($1,18,12)}' > 720.listq
```

として画像リストのファイルを作成してから、

```
q_headlst2 @720.lista 720a.clk 720a.opt 720a.temp 720a.tel1 720a.tel2
q_headlst2 @720.listq 720q.clk 720q.opt 720q.temp 720q.tel1 720q.tel2
```

などとする。または、720.lista, 720.listq などの中身をすべてのファイルでなく、解析に使用するファイルのみにしたり、観測モードや天体ごとに分けたリストにするのもよい。

5.1.2　ECO 画像について

通常の観測ではほとんど関係ないが、もしデータ取得モードが ECO モードであった場合は、特殊な処理が必要なので、COMICS 装置グループに問い合わせてください。

5.2 撮像 (Nimg, Qimg) の解析

5.2.1 ダーク

ダークの作成

ダークは、観測終了後もしくは観測開始前に取得される。天体や標準星、ドームをとったのと同じ exposure 型のクロックで取得されているはずだが、frame 数や CoAdd モードは自由なので、必ずしも全く同じクロックが使用されるとは限らない。むしろ、ダークのノイズの測定などのため、CoAdd モードは 0(RAW) ないし 1(ADD) が普通で、また、chop もしない場合が多い。ここでダークを求めるというのは結局、1 exposure あたりのダーク量を示す画像を作成することに相当する。

方法としては、同じクロックの画像は file 内での平均をとってから、ファイル間平均をとり、さらに、画像 1 枚あたりに含まれる exposure 数で割って、各基本クロック 1exp あたりのダークになおす。

例えば、下表のような 11659-11663 の画像から、撮像ダークを作成する場合を考える。

画像 No.	stare/chop	クロック	できたダーク (注)
11659, 11661, 11663	stare	PP=50, ND=1, Nexp=24, CoAdd=1, Ystart=1	0720imdark50_1

注: 0720imdark50_1: PP=50, ND=1 での撮像 1exp あたりのダーク

まず、各ファイルの時間方向平均 (frame 間平均) をとる。これには、q_list_stat が使える。q_list_stat で、ファイル名と、検出器、ピクセル範囲 (全範囲"- -") を指定し、":"で、時間方向平均であることを示す。次にこの出力結果 (m11659 m11661 m11663) を、q_fcombine でファイル間平均 (ave) をとる。もともとの COMA00011659 等の画像では、各 frame 24 exposure され、CoAdd=1 で和が求められているので、平均画像も 24 exposure 分に相当する。これを補正するために最後に q_arith での割算を行う。

```
q_list_stat /data1/20000720A/COMA00011659 1 - - : m11659
q_list_stat /data1/20000720A/COMA00011661 1 - - : m11661
q_list_stat /data1/20000720A/COMA00011663 1 - - : m11663
q_fcombine m11659 m11661 m11663 ave=0720imave
q_arith 0720imave / 24.0 0720immdark50_1
```

作成しなければならないダークの種類は、その日の観測で取得した天体、標準星、ドームフラット (分光用) のファイルと、img/spc, PP, ND, Ystart のクロックの組合わせが同じものである。

ダークリストの作成

上で作ったダーク画像は、リストにいれておくと便利。

ダークリストファイル darklist の例

```
20030618 img  30   1  60   /work3/okada/COMICS/obs200306/Qimg/dark/0618imdark30_1_120
20030618 img  30 120   1   /work3/okada/COMICS/obs200306/Qimg/dark/0618imdark30_120_240
20030618 img  50 168   1   /work3/okada/COMICS/obs200306/Qimg/dark/0618imdark50_168_240
20030619 img  30   1  80   /work3/okada/COMICS/obs200306/Qimg/dark/0619imdark30_1_80
20030619 img  30   1  60   /work3/okada/COMICS/obs200306/Qimg/dark/0619imdark30_1_120
20030619 img  30 120   1   /work3/okada/COMICS/obs200306/Qimg/dark/0619imdark30_120_240
20030619 img  50 168   1   /work3/okada/COMICS/obs200306/Qimg/dark/0618imdark50_168_240
20030618 spc 400   1   1   /work3/okada/COMICS/obs200306/QMspc/dark/0618spdark400_1
20030618 spc 600   1   1   /work3/okada/COMICS/obs200306/QMspc/dark/0618spdark600_1
20030619 spc 400   1   1   /work3/okada/COMICS/obs200306/QMspc/dark/0619spdark400_1
20030619 spc 600   1   1   /work3/okada/COMICS/obs200306/QMspc/dark/0619spdark600_1
```

1column 目が日付、2column 目が撮像 (img)/分光 (spc) の別、3column 目がピクセルレート (PP)、4columnd 目が電子的 ND 値、5column 目が読みだし開始の Y(Ystart)、6column 目がそのダーク画像のファイル名 (フルパスで書いておくのが良い)。

5.2.2 フラットの作成

フラットには、ドームフラットとスカイフラットのいずれかを使う。撮像ではドームフラットはスカイと同じクロックで取得すると saturate してしまうので、普通セルフスカイフラットを用いる。また、分光ではスカイ画像には大気輝線が入ってしまい、微妙な波長ずれがあると補正できなくなるので、普通ドームフラットを用いる。以下では、撮像でスカイフラットを使うとして述べる。

フラットに使うスカイは、セルフスカイである。chop をしているので、chop beam ごとのスカイ平均などからスカイフラットを作り、off-beam sky を on-beam データのフラットとして使う (あるいはその逆)。そのため、chop beam ごとに画像を分離する必要がある。

撮像では、スリット上に一度結像するため、スリット表面のムラがフラットに反映されてしまう。このため、撮像 / スリットビュワーでは撮像でとったスカイ、各スリット幅のスリットでとったスカイをフラットとしてを使う必要がある。また、少なくとも撮像系フィルターを変えた場合にも、検出器上で観測される感度の凹凸 (スリット表面模様かゴミに対応すると思われる) が動くので、同じフィルターでフィルターを動かさずにとったスカイを使う方が無難である。

光学系の安定性が高ければ、例えば一晩通してとった同フィルターでの撮像データからできる off-beam ごとのスカイの平均などをとってフラット精度を高めることができるはずだが、現状ではできない。それゆえ、同じ天体を同じフィルターのまま取っているときのセルフスカイの範囲で平均化するのが次の手段である。ただし、空の明るさが全体として変化するので、1 ファイルごとに規格化してから平均化するのがよい。しかし、場合によっては、検出器上で観測される感度の凹凸位置が動き、平均化できないばあいもある。そのような場合には、まさしくその画像を取得していたときの off-beam の画像をフラットとして使う。従って、平均化してフラットを作成したら、そのぼこぼこ具合いを確認するのがよい。

また、現在、上記の方法でスカイフラットを得ると、視野全体のスケールで 10% のオーダーで gradient がのることがわかっている。このフラットをそのまま使い、視野の真ん中と端で測光した結果を比べると、フラットで割らない場合より測光精度が悪くなるため、この gradient は本来のフラットではないと考えられている。従って、視野全体に拡がるような天体を観測したり、標準星と天体が視野の別の場所にのっているなどの場合、現在のところ、空間的に低次のゆらぎをフィットして除いたものを、フラットとして使うのがよいと思われる。ただし、以下の解析例にはその手順は含まれていないので注意。

1. 撮像画像のリストを作成、分光のリストも同時に作っておく。画像リストには、ダーク、フラット、stare モードで取得した画像は含まれないように編集する。また、ヘッダのみの画像も含まれないようにしておく。さらに、データとして使う画像のみ残しておく。

```
ls /data1/20000720A/COMA* | awk 'substr($1,25,5)%2==0{print $0}' > 720imga
ls /data1/20000720A/COMQ* | awk 'substr($1,25,5)%2==0{print $0}' > 720imgq
vi 720imga
vi 720imgq
```

2. COMA 画像に対して (スカイ)− (ダーク) を行ってから、ビーム毎に画像を分け、さらにビーム毎に平均化。

まず出力先リストを作成 (ここでは作業ディレクトリの直下に画像を置く例)。

```
awk '{print "a"substr($1,25,5)"d"}' 720imga > 720imga_sd
```

ビーム分離用リストも作成 (bm1: on-beam, bm2: off-beam)。

```
awk '{print $1".bm1"}' 720imga_sd > 720imga_sd1
awk '{print $1".bm2"}' 720imga_sd > 720imga_sd2
```

このリストファイルを使って、ダーク差引 (q_subdark) および ビーム分離 (q_bsep)。

> 注) q_subdark は現在使えません。機能としては、ダークを引きたいファイルがあったとき、darklist から、観測日、PP, ND, Ystart のパラメータが一致するダークファイルを探し、それを読みに行き、ダークを引きたいファイルの exp 数や beam 数をあわせてダークを引いてくれるものです。適合ダークファイルやクロックを手動で確認すれば、q_arith で同じことができます。

```
q_subdark @720imga 20000720 DARK/darklist @720imga_sd
q_bsep @720imga_sd @720imga_sd1 @720imga_sd2
awk '{print "yes | rm "$1}' 720imga_sd | csh
```

1 行目が、720imga に入っている画像に対して、サブディレクトリ DARK にある darklist からダーク画像を指定して、適合ダークを引いた画像を作成している。これが、720imga_sd で指定された画像に出力される。次に、2 行目で、720imga_sd (COMA 画像で各フレームでダークを引いた frame がしまわれている画像) を、chop beam ごとに分離して、720imga_sd1 にあるファイルと、720imga_sd2 にあるファイルにしまっている。通常 q_bsep では大量の、しかも COMA 画像を扱うので、出力結果も含めると大量の記憶領域を使用する。そのため、作業がすんだ後はすぐに一時ファイルを消す方がよい (3 行目)。

こうしてビームごとに分離された画像を、例えば平均化したり、メジアンをとったりという統計処理をしてスカイフラットを作成すれば良い。以下は、各ファイルごとに平均 (m_XXXXX) と標準偏差 (s_XXXXX) をとっている例で、やはり一時ファイルはすぐに消去している (3,4 行目)。

```
cd IMGFLAT/0720
awk '{print "q_list_stat "$1" 1 - - : m_"$1" s_"$1}' 720imga_sd1 | csh
awk '{print "q_list_stat "$1" 1 - - : m_"$1" s_"$1}' 720imga_sd2 | csh
awk '{print "yes | rm "$1}' 720imga_sd1 | csh
awk '{print "yes | rm "$1}' 720imga_sd2 | csh
```

必要に応じてこうしてできた画像を規格化し、フラットとする (規格化する際には、スリットの有無によって規格化のスケールが変化してしまうことに注意)。さらに、同じ天体、同じフィルターの画像から作ったフラットを平均化する。

天体が拡がっていて、off-beam が視野外であるときは、COMQ のスカイフラットとして、off-beam を使う。天体がコンパクトで、視野内に on, off 両方が写っているときは、on の天体が写っている場所は off のスカイ、off の天体が写っている場所は on のスカイを使うことになる。この場合、あらかじめ on の部分と off の部分を広めに切り出してしまい、それぞれ off, on の同じ部分をスカイとして切り出して引き算するのが楽である。

5.2.3 バッドピクセルのリストアップ

ダーク上ホットピクセル

検出器には、カウントが saturate してしまっているホットピクセル (群) がある。これはチョップ差引した画像や、ドームやスカイからダークを引いて作った画像上ではカウントがほぼゼロになるため、バッドピクセルとして検出できない。そこで、たとえばダーク画像を使ってホットピクセルを探す。

方法としては、各ピクセルの周りにある適当な数のピクセル (±3pix など) の平均と標準偏差を求め、一定以上はずれている (平均 $\pm 3\sigma$ 以上など) をバッドピクセルとし、バッドピクセルに 0 を、その他のピクセルに 1 を代入したマスク画像を作る。ただし threshold をどこにとるかのが適当かは、case by case なので、作ったマスク画像を見て、バッドピクセルの認定が適切かどうか確認すること。

この処理は q_シリーズにはない。

フラット上のバッドピクセル

フラットのような光の入っているフレームで見ると、明らかに周辺に比べてカウントが低いピクセル (やその群) が存在する。これは検出器上のゴミやスリット上の金蒸着のムラのために感度が落ちている場所であると考えられる。このようなピクセルの他に、作成済のフラット上で、カウントが異様に低く明らかにバッドピクセルとわかるものや、フラット上ですじが残ってしまっていて以降使えないピクセル位置などを、q_badpix, q_2val などを使って処理したり、目で読んで追加等を行う。q_badpix は、入力画像で各ピクセル値が周辺ピクセルの平均値と比べてある割合よりも高いもの、低いものに値 0 を、その間のものに値 1 をいれた画像を作成する。たとえば、フラット画像 flat0720 で、周辺平均よりも 20%以上ぶれているピクセル (80%以下と 120%超) を取り出したいときには

```
q_badpix flat0720 0.8 1.2 flat0720.bp
```

とすればよい。ここでも、どの程度ぶれた値をバッドピクセルとするかについてはいくつか値を変えて様子を見てみる必要がある。

フラットは全体的に、比較的値が一定なので、この方法 (周囲の平均の何%以上、という考え方) でバッドピクセルを取り出せることが多いが、場合によっては、ダークと同様、周囲の標準偏差を基準にした方がうまくいくこともある。

ケラレ等で光が入らなくなっているピクセル

上記二つの処理では、検出器のはしの方でケラレ等で光が入らなくなっているピクセルは拾い出せない。そこで、このようなピクセルは手で指定してやる必要がある。たとえば、x=1−320, y=1−20 の範囲がケラレている場合には、まずそのケラレている範囲を 0、その他を 1 で埋めたリストを作成してから、テキストファイルを画像ファイルに変換する。

```
awk 'END{for(i=1;i<=241;i++){for(j=1;j<=320;j++){if(y<=20){print 0}else{print 1\}}}}' > kerare
q_mkimg kerare kerare.bp 320 241 1 1
```

マスク画像の作成

以上から、バッドピクセルは、「ダーク上のホットピクセル + フラット上のバッドピクセル + ケラレピクセル」として得られる。3 つのファイルはいずれもバッドピクセルに 0 を、それ以外に 1 を入れた画像になっているので、全体としてマスク画像を作成するには、

```
q_arith darkim.bp + flat0720.bp temp1
q_arith temp1 + kerare.bp temp2
q_2val temp2 2.5 mask
```

このようにして作られたマスク画像 (mask) は、もとの画像に掛け算することで、バッドピクセルでの値をすべて 0 にした天体画像を作るのに使う。

5.2.4 天体、標準星の解析

チョップ差引 (**COMQ** 画像を使う)

chop をして取得した画像で、背景の差引のために on-beam 画像と off-beam 画像の差引を行う。これは実際には COMQ 画像が結果に相当する。

$$\Sigma(\text{on-beam 画像} - \text{off-beam 画像})$$

COMQ 画像は各 chop beam については和になっているので、もし frame 間や exposure 間の平均や標準偏差が必要な場合には、q_bsep によってビームを分離し、それに q_list_stat 等で統計処理を行う。

単位時間化

目的天体と標準星の画像をそれぞれ積分時間で割り、1sec あたりの画像に直しておくと、あとでカウントを明るさの単位に直すときに楽である。しかし一方、画像の平均化 (足し算) する予定のファイルが、異なる積分時間を持っていた場合、1sec あたりに直してしまうと、逆に足し算の処理の際に、積分時間で重みをつけて足す作業が必要になり、かえって面倒である。従って、この時点で単位時間化を行なうことはあまりおすすめできない。

フラット処理

COMQ 画像を、フラットで割る。

同じ位置でとった画像ファイルを平均化

同じフィルターでとった画像は、まったく同じ位置なら単純に平均化することができる。例えば、フラット処理済の同位置同フィルターでとった画像ファイル名が、M82_08.7.p1 の中にリストされているとすると、

```
q_fcombine @M82_08.7.p1 ave=aveM82_08.7.p1 med=medM82_08.7.p1 sig=sigM82_08.7.p1
```

で平均画像が得られる。画像に重みづけして足す、q_wcombine を用いたり、マスクを指定したりすることもできる。原理的には、間に望遠鏡の移動が入らない限り、この方法でよいので、特に 1 ファイルでは天体が見えないような観測の場合は、この方法で画像を足す。(?) しかし実際には天体の位置が微妙にずれていくことがあるので、1 ファイルで位置測定ができるような天体の場合、以下で説明する画像のシフトを行なって、平均画像を得たほうがよい。

画像のシフト量測定

画像の足し合わせのためには、各画像間での位置ずれ量を測定してシフトしなければならない。ある天体の画像の視野内に点源がいくつか写っている場合には、これら点源の位置を q_photo 等で測定し、X、Y 方向のずれ量を求めれば良い。

しかし拡がった天体の場合は別の方法で位置ずれを測定する必要がある。一つの方法は、同一天体の同一フィルター、異位置画像のそれぞれで、天体のほぼ同じ部分を含む矩形領域 (できれば天体全体を含みながら大きすぎない領域) を指定し、その矩形領域の X 方向および Y 方向それぞれでの圧縮のプロファイルを比較する。これらの相互相関をとって、ずれ量を測定する (実際には相互相関までとらずとも、目で見て比較することで 0.1pixel の精度で位置ずれが決定できる)。この方法を図 5.2.4 に示す。このとき、領域内に含まれるバッドピクセル等が入ってしまった column や row は、相互相関を取る場合はずすべきである。

周期ノイズののっている画像の補正

画像がひどくノイズで乱されているような場合には、その前に、このノイズを除去するような手作業が必要になる。これは、実際には、天体からの光がのっていないようなチャンネルのチャンネル間平均を、各チャンネルからひいたり、チャンネル内の各 row 平均を全同一 row ピクセルからひいたりすることでかなりの部分が除去できる。

shift & add

画像をシフトする前に、天体にマスク画像を掛けておく (q_fcombine, q_wcombine でマスク画像を指定すると、コマンドの中で天体にマスクを掛けてくれるようだ)。たとえば、フラット処理後の画像 q?????f たちのファイル名が、qXXXXXf.list に格納されているとすると、

```
cat qXXXXXf.list
| awk '{print ``q_arith ../q''substr($1,53,5)''f \\* mask q''substr($1,53,5)''fm''}'
```

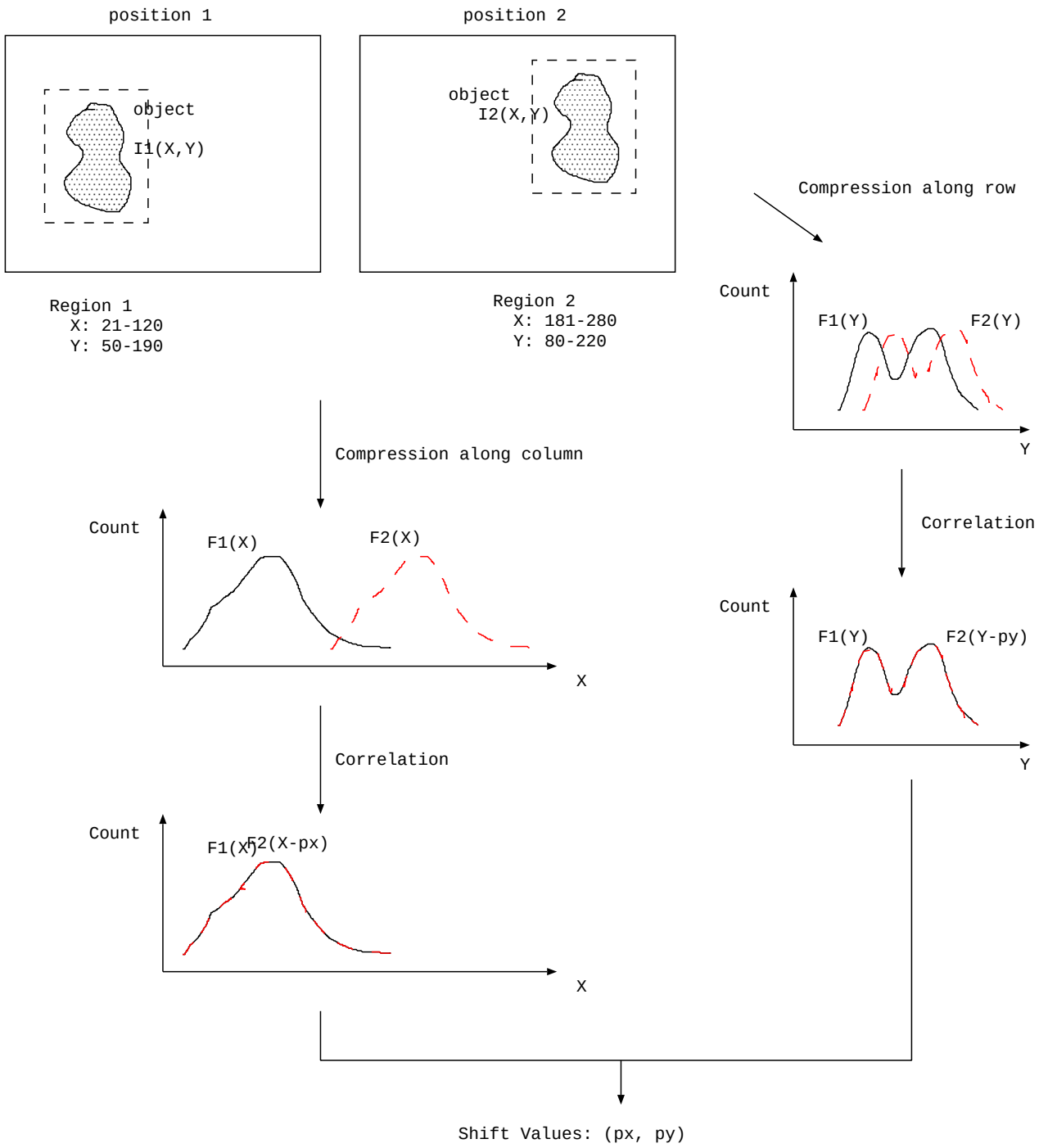

図 5.1: 拡がった天体の位置合わせの手法

細かいことだが、q_arith で掛け算を行なうときは、「 * 」ではなく、「 * 」が必要であり、さらに上のように awk で書かせる場合は「 * 」としなければならないようようだ。(環境依存かもしれない)

求まったずれ量をもとに、各画像を基準位置までシフトする。これには COMICS の s_シリーズの中の s_shift を使うか、IRAF の imshift コマンドを使う方法があるが、COMICS の画像は X、Y、時間、検出器の 4 次元構成であるため、そのままでは imshift を通らないので、

```
q_chgaxis 3  aveM82_08.7.p1  aveM82_08.7.p1.nax3
```

などとして画像を 3 次元化する作業が必要となる。ただし、q_chgaxis を通った後は、W (検出器) Z (時間) をこの順で軸から落とし、一つ上の軸 (Z、Y) に含ませてしまうだけなので注意。

s_shift であれば、

```
s_shift q38559fm 30 -10 q38559fms
```

などとなる。ただし、ここで指定できるピクセル値は整数なので、1pixel 以下の精度でシフト&アッドを行ないたい場合は、サブピクセルに分割する。(q_expand)

マスク画像についても同様にシフトを行なう。

次に、平均化は、q_fcombine を用い、「 画像の和/マスクの和 」で行なう。この場合、厳密にはピクセルごとに S/N が異なることになる。もし画像に重みをかけたい場合は、q_wcombine を用いる。

```
q_fcombine @qXXXXXfms.list msk=@maskXXXXX.list ave=ave.p1
```

注) このコマンドでは、マスク画像は「 使いたいピクセル = 0 」「 マスクしたいピクセル = 1 」で指定する。

スカイレベルの補正

天体の光が入っていないと考えられるような場所でも、背景放射の変動や雲の変動によって、スカイレベルが全体として 0 から有意にずれている場合がある。このような場合には、0 次ないし 1 次のスカイ成分を画像からさしひいてスカイレベルをゼロにそろえる。

残ってしまったバッドピクセルの補間

画像の重ね合わせ処理後にも、画像を取得した位置の種類が少ないときなどバッドピクセルが残ってしまう場合もありうる。そのような場合には、バッドピクセルをリストして、IRAF の fixpix などを使って補間する。そのようなピクセルがあるかどうかについては、マスク画像間の和をとって 0 (マスクされている) のままのピクセルがあるかどうかを調べればわかる。このとき、ケラレの場所は周辺から補正のしようがないので、除く (下の例ではたとえば、x=282−320, y=1−23,236−240 は使えないし使う必要がないので除く)。

```
q_fcombine @M82_08.7_msk ave=M82_08.7.msk
q_list_stat M82_08.7.msk 1 1-281 24-235 1 | awk '$5==0{print $2,$2,$3,$3}' > M82_08.7.fxpx
mv M82_08.7.msk M82_08.7.msk.fits
IRAF cl> fixpix M82_08.7.msk.fits M82_08.7.fxpx
```

これでも取れないバッドピクセル (たとえば、画像を目で見て明らかにカウントがおかしいところ) は、リストして手で直すしかない。

フラックス補正

ここまでの処理を、目的天体と標準星の両方について行ったら、標準星を使って目的天体のカウントを実際の明るさに直す。

まず、同じフィルター、近い Airmass で取得した標準星の、そのフィルターでの明るさを Cohen 氏らのデータベースから計算する。中間赤外線域では各フィルターでの明るさというのは N バンド全域等以外はほとんど求められていないので、フィルターの透過範囲分、Cohen 氏らのスペクトルデータを積分することで求める (ちなみに、$1[\mathrm{W/cm^2/\mu m}]=(\lambda[\mu\mathrm{m}])^2/3\times10^{16}[\mathrm{Jy}]$) 。フィルターの透過範囲と中心波長、透過率曲線および、Cohen 氏らのオンラインデータへのリンクは COMICS 公開 Web (http://canadia.ir.isas.jaxa.jp/comics/open/guide/index.html) 参照。

Cohen 氏らのデータベースから計算する際、最も簡単な方法はフィルターの幅分だけ矩形で切り出して積分するやり方である。より正確にはフィルターの透過率曲線をはじめとして、波長に依存するすべてのパラメータを考慮することになる。

次に、観測した標準星のカウントを求める。たとえば標準星像を囲む矩形領域内のカウント和や、q_photo での簡易カウント測定結果、あるいは IRAF の測光タスクを使って星のカウントを求め、これと積分した星のフラックスと比較して、1 カウントがどれだけのフラックスに相当するかを計算する。この変換係数を天体画像にかけてやれば、天体画像を明るさになおすことができる。天体が広がった天体の場合にはさらに 1pixel あたりの視野 (撮像では 0.13”/pixel、0.0166 $\mathrm{arcsec^2/pixel}$) で割れば、輝度に直せる。

波長間の位置合わせ

カラー画像を作ったりするのに、異なるフィルターでとった画像どうしの位置をあわせたいときには、他にうつっている点源で位置をあわせるか、たとえば上で述べたシフト&アッドを異波長間でも適用するなどを、行わなければならない。しかし後者は天体自身の性質により、異波長間であわせるのが正しいのかについて検討する必要がある。このような方法が使えないのであれば、標準星画像などから、異フィルターの画像ではどの程度位置ずれを起こしているかを測定したり、望遠鏡トラッキングが異フィルター間でも十分ずれていないことを確かめたりする必要があるだろう。

撮像画像のノイズ

以上のようにしてできた画像のノイズを見積もるには、各画像ファイル間での天体カウントのバラツキをとる方法もあるが、測光のように精度が必要な場合以外であれば、スカイ部分のピクセル間のバラツキを調べるのがもっとも簡単である。これは、中間赤外線の場合非常に明るい天体を除いて、普通スカイの方が天体よりもずっと明るいために、入射カウントのゆらぎのほとんどはスカイが担っていることに起因している。ただしこの場合にはフラット処理がきちんと行えていなければならない。(そしてもちろん、天体がスカイに比べてずっと暗くなくてはならない) 。

一次解析は以上である。

5.3 分光 (NL, QM) の解析

図 5.3 は、分光解析の流れを、低分散分光、点源を例に示したものある。他のモードでも、基本的な流れは同じである。

5.3.1 ダーク

ダークの作成、ダークリストの作成ともに、方法は撮像と同じであるので、5.2.1 参照。

ただし、3 節でも述べたが、N 低分散など、分光検出器の一部のみを使っている場合、どの検出器番号についてダークが必要なのかを確認しなければならない。ダークは通常、全検出器について取るため、分光ダークの検出器番号 3 番のデータは、z=3 となるが、天体を検出器番号 3,5 で取っていた場合、天体のファイルでは z=1,2 となるためである。また、COMICS のクイックルックソフトでも、検出器番号でなく z の値を解釈するため、検出器番号 1,2 のデータであると勘違いしやすい。

5.3.2 読みだしパターンノイズの低減

N 低分散のように、すべての検出器を使わない観測モードの場合、空いている検出器で参照用のデータを取得している。読み出しはすべての検出器で同時に行なっているので、天体を分光している検出器から、参照用の検出器を引き算することで、読みだしパターンノイズを減らすことができる。

また、1 つの検出器は x=20 ピクセルごとの 16 チャンネルから構成されており、それぞれのチャンネルも同時に読み出しているので、よりきちんとした解析では、参照用の検出器の中から異常なノイズなどの乗っていないいくつかのチャンネルを選んでメジアンをとり、それを天体の全チャンネルから引き算すると、よりよい。

すべてのチャンネルからメジアンをとる場合は、s_subch というコマンドが使える。まず検出器ごとに画像を分け、

```
q_list_stat TWHya.pos1 1 - - 1 TWHya.pos1.w1
q_list_stat TWHya.pos1 2 - - 1 TWHya.pos1.w2
```

次に Noise パターン参照検出器画像で 16ch の median をとり、ノイズパターン画像をつくり、

```
s_subch TWHya.pos1.w2 REF TWHya.pos1.w2.REF
```

このノイズパターン画像 (TWHya.pos1.w2.REF) を分光画像 (TWHya.pos1.w1) からひくことで、パターンノイズが除去され S/N が改善。

```
q_arith TWHya.pos1.w1 - TWHya.pos1.w2.REF TWHya.pos1.w1.SUB
```

ノイズは場合によるが、3–4 割も減少する。

この作業は、天体と標準星の COMQ 画像に対してと、フラットの作成途中で行なう (5.3.3 参照)。

5.3.3 フラットの作成

分光ではドームフラットを使う。ドームフラットは、同一 grating position ごとに最低 1 つのフラットが撮られているはずで、天体を割るときは各々対応するフラットを用いる。

まず、フラットの COMA 画像 (COMA0000100 とする) を平均し、ダークを引く。

> 注) q_subdark は現在使えません。機能としては、ダークを引きたいファイルがあったとき、darklist から、観測日、PP, ND, Ystart のパラメータが一致するダークファイルを探し、それを読みに行き、ダークを引きたいファイルの exp 数や beam 数をあわせてダークを引いてくれるものです。適合ダークファイルやクロックを手動で確認すれば、q_arith で同じことができます。

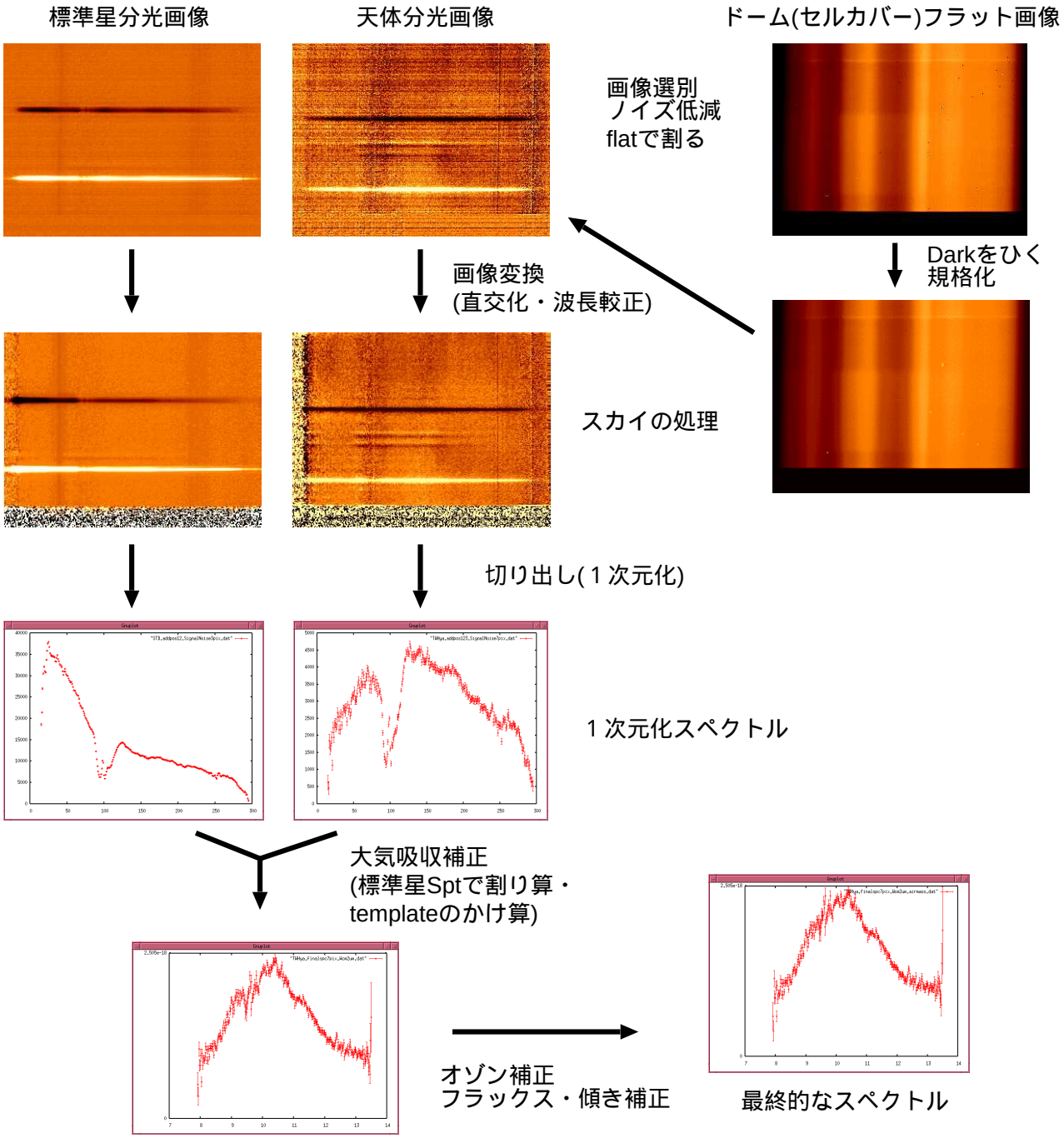

図 5.2: 分光解析の流れ (低分散分光点源の例)

```
q_list_stat COMA00000100 - - - : DomeFlat
q_subdark DomeFlat 20030618 DARK/darklist DomeFlat_subDK
```

N 低分散のように、空いている検出器で参照用のデータを取得している場合、ここで、5.3.2 と同様に、参照用検出器からノイズパターン画像をつくり、それを引き算する。

```
q_list_stat DomeFlat_subDK 1 - - 1 DomeFlat_subDK.w1
q_list_stat DomeFlat_subDK 2 - - 1 DomeFlat_subDK.w2
s_subch DomeFlat_subDK.w2 REF DomeFlat_subDK.w2.REF
q_arith DomeFlat_subDK.w1 - DomeFlat_subDK.w2.REF DomeFlat_subDK.w1.SUB
```

フラットの光の入っている領域の平均を用い、規格化する。

```
q_list_stat DomeFlat_subDK.w1.SUB 1 10:320 32:240 1
1:1 10:320 32:240 1:1 2.661400e+03 1.001173e+03 64999
q_arith DomeFlat_subDK.w1.SUB / 2661.4 DomeFlat_subDK.w1.SUB_n
```

中分散の場合は、検出器間の感度補正も含むので、たとえば w=3 の x=130:250, y=70:220 の領域の平均を用い、全検出器に対して規格化を行なう。

5.3.4 バッドピクセルのリストアップ

これは撮像とまったく同じ方法で行なえるので、5.2.3 参照。

5.3.5 天体、標準星の解析

基本的にチョップ差し引き後の COMQ 画像を出発点とする。COMQ 画像に問題がある場合 (突発ノイズが乗っている、チョッピングが途中で止まっている、2ch ノイズが乗っている etc...) は、COMA 画像にもどって”きれいな” COMQ 画像相当を作成してください。

画像の足しあわせ

同じポジションで複数の COMQ 画像がある場合、足しあわせられる画像はすべて足し合わせる。位置がずれているなどで足しあわせられないものは、とりあえず足さずに残しておく。

```
q_fcombine COMQ00000010 COMQ00000012 COMQ00000014 ave=TWHya.pos1
```

フラットで割る

COMQ 画像を、対応するフラットで割る。

分光画像の直交化と波長更正

ノイズの低減などの処理が終ったら、スペクトルデータを切り出すための準備として、分光画像の波長一定軸、空間一定軸を直交化するため画像変換を行なう。この画像変換の際に、波長較正も行ない、変換画像上でピクセル・波長関係も一致させる。画像変換のための準備として、波長一定軸、空間一定軸を調べる。(図 2.2 を参照)

1. 波長一定軸の決定

波長一定軸は、空の放射スペクトル画像から決める。波長更正式は、ある y に対し、$\lambda[\mu\mathrm{m}] = Ax[\mathrm{pix}] + B$ で表わされるが、図 2.2 のように y によって A, B が異なるため、さらに、$A = a_0 y + a_1$, $B = a_2 y + a_3$ のように

y 依存性を求め、a_0, a_1, a_2, a_3 を波長一定軸のパラメータとする。中分散の場合は、これをデータのとれている全検出器について行なうが、ここからの作業は、検出器ごとにファイルを分けたほうがやりやすい。

具体的には、まずスカイ画像を作る。これは、標準星や天体の COMA 画像を平均化することで得られる (ダークを引き、フラットで割る)。

```
q_list_stat COMA00000012 - - - : TWHya.pos1.skyimage
q_subdark TWHya.pos1.skyimage 20030618 DARK/darklist TWHya.pos1.skyimage_subDK
q_arith TWHya.pos1.skyimage_subDK / DomeFlat_subDK.w1.SUB_n TWHya.pos1.skyimage.Fl
```

波長一定軸は全ファイルに対して求めることができるが、grating を動かさない限りそれほど変わるものではないので、同じパラメータが適用できることが多い。ただし、チェックの意味も含め、上のようにして得られたスカイ画像を、例えば同じ天体を連続して撮っている場合には平均をとり、天体ごとに波長一定軸を求め、比較してみるのがよいかと思われる。また、grating を動かした場合は、同じ grating position に戻しても再現性は精度よくは保証されていないので、別々に波長一定軸を求める。以下では、波長一定軸を求めるスカイ画像を skyimg とする。

N 低分散の場合は、波長一定軸は q_sky_nlow を使って求めることができる。

```
q_sky_nlow skyimg 1 - default 1 2 > skyimg.fit
```

このコマンドでは、y=30 から y=220 までの 20ヶ所の y において、大気輝線のデータベースとの相関をとることで、$\lambda[\mu\mathrm{m}] = Ax[\mathrm{pix}] + B$ の波長ピクセル関係を出している。同じ原理は、他の観測モードにも使えるが、現在のところ、まだ q_sky_nlow に対応するコマンドはない。

フィット結果は skyimg.fit に入るので、GNUPLOT などで表示して確認する。3 カラム目が切り出した y 座標、6 カラム目がフィットした A の値、8 カラム目がフィットした B の値になっている。とくに y=30 で切ったフィットは光がケラレている場合があるため、良くフィットできていない場合がある。その場合は y=30 のフィット結果を削除する。

次に、今度はこのフィットしたパラメータ A,B をそれぞれ y の 1 次関数として最小 2 乗フィットし、$A = a_0 y + a_1$, $B = a_2 y + a_3$ という結果を得る (図 5.3)。この、a_0, a_1, a_2, a_3 を波長一定軸のパラメータとする。

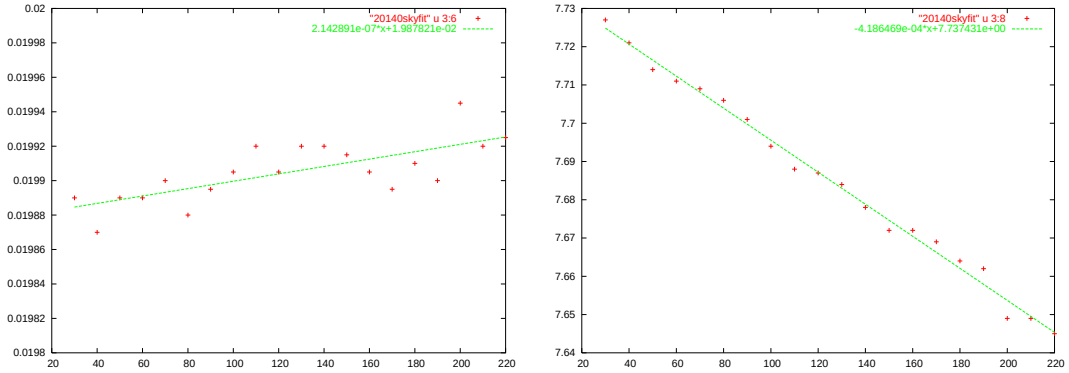

図 5.3: 波長ピクセル関係のフィット結果確認とフィットパラメータの 1 次関数フィット

2. 空間一定軸の決定

空間一定軸の決定には、検出器の差引をし、フラットで割った標準星分光画像を使う (点源天体でもよい)。各 x に対し、星の位置のピーク y を求め、それを $y = b_0(x - b_1)^2 + b_2$ のような 2 次式でフィットし、b_0, b_1, b_2 を空間一定軸のパラメータとする。これについても、原理的には点源の全ファイルについて求めることができるが、少なくとも 1 回の観測中でパラメータが有意に変化することはないと考えられる。従って、S/N のよい点源のみを使ったり、位置ずれをおこしていないファイルを平均したスペクトルを使うのがよい。以下では、空間一定軸を求めるファイルを STD_sf とする。

具体的には、q_startrace を使う。星の入っている y の範囲が y=62–92 だとすると、

```
q_startrace STD_sf 1 30-290 62:92 1 > STD_sf.str
```

STD_sf.str にピーク検出結果が格納される。この 2 カラム目が x 座標、10 カラム目がピークの y 座標の値なので、これをまた GNUPLOT などで表示して、ピーク検出がうまく行なわれているかチェックする。オゾンなど大気の輝線が強い波長域ではシグナルが弱くてピーク検出がうまく行なわれていない場合があるので、その場合はその結果を削除してから、フィットをかける。中分散の場合は、これをデータのとれている全検出器について行なう。

フィットは、$y = b_0(x - b_1)^2 + b_2$ のような 2 次式で行なう (図 5.4)。2 次の多項式になるのは、設計上の理由である。中分散の場合は、5 検出器分にスペクトルが広がるため、1 検出器内ではほとんど 1 次の多項式として扱える。逆に、無理に 2 次でフィットしようとすると、特に光の弱くなる波長帯が入る端の検出器では、妥当な結果が出ないことがあるため、1 次式でフィットするのがよい。

ここで得られた b_0, b_1, b_2 が、空間一定軸のパラメータである。

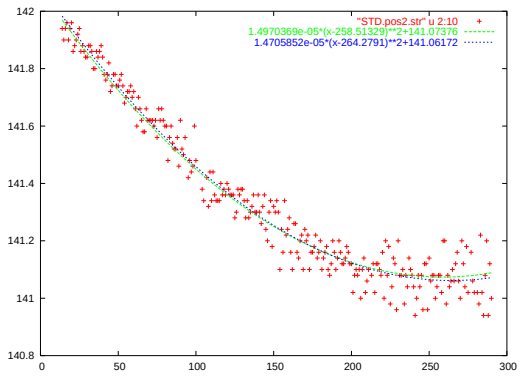

図 5.4: 空間一定線とそのフィッティング結果の例

3. 画像変換

以上の結果をもとに、IRAF で画像変換を行なう。用いるタスクは、geomap と geotran で、geomap で画像変換を決定し、geotran で実際に画像変換する。まず、準備として、geomap に与えるデータを作成する。

```
q_transtable2  a0 a1 a2 a3 b0 b1 outputfile aa bb
```

ここで $a0$, $a1$, $a2$, $a3$, $b0$, $b1$ はここまでの作業で求めた値に対応する。aa, bb は変換後の波長ピクセル関係 ($\lambda[\mu\mathrm{m}] = aa \times x[\mathrm{pix}] + bb$)。これはコマンドが受け付ける範囲で自由に決められるが、天体のシグナルが乗っている y 座標のあたりの波長・ピクセル関係に近い値を採用すると、変換後に視野外になってしまう部分が減り、また天体のシグナルに対する画像変換による影響が少なくなるかもしれない。また、aa, bb を天体と標準星で共通にしておくと、のちの解析が楽である。

ちなみに、これらの N 低分散におけるパラメータの例は、

```
a0=2.669213e-08
a1=1.990141e-02
a2=-3.758642e-04
a3=7.578833e+00
b0=1.5874755e-05
b1=195.9228
```

次に、IRAF の geomap を実行する。上記の q_transtable2 の outputfile を、trans.dat とする。login.cl のあるディレクトリで、

```
cl
```

として IRAF を立ち上げ、解析しているディレクトリに行く。

geomap のパラメータは以下のように設定。

```
                                I R A F
                     Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = immatch
   TASK = geomap

input   =                         The input coordinate files
database=                tranpar  The output database file
xmin    =                     1.  Minimum x reference coordinate value
xmax    =                   320.  Maximum x reference coordinate value
ymin    =                     1.  Minimum y reference coordinate value
ymax    =                   240.  Maximum y reference coordinate value
(transfo=                       ) The output transform records names
(results=                       ) The optional results summary files
(fitgeom=                general) Fitting geometry
(functio=              polynomial) Surface type
(xxorder=                       3) Order of x fit in x
(xyorder=                       3) Order of x fit in y
(xxterms=                    half) X fit cross terms type
(yxorder=                       3) Order of y fit in x
(yyorder=                       3) Order of y fit in y
(yxterms=                    half) Y fit cross terms type
(reject =                  INDEF) Rejection limit in sigma units
(calctyp=                 double) Computation type
(verbose=                    yes) Print messages about progress of task?
(interac=                     no) Fit transformation interactively ?
(graphic=                stdgraph) Default graphics device
(cursor =                       ) Graphics cursor
(mode   =                      ql)
```

geotran のパラメータを以下のように設定

```
                                   I R A F
                     Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = immatch
   TASK = geotran

input   =                         Input data
output  =                         Output data
database=                         Name of GEOMAP database file
transfor=                         Names of coordinate transforms in database file
(geometr=                geometric) Transformation type (linear,geometric)
(xin    =                    INDEF) X origin of input frame in pixels
(yin    =                    INDEF) Y origin of input frame in pixels
(xshift =                    INDEF) X origin shift in pixels
```

```
(yshift =                INDEF) Y origin shift in pixels
(xout   =                INDEF) X origin of output frame in reference units
(yout   =                INDEF) Y origin of output frame in reference units
(xmag   =                INDEF) X scale of input picture in pixels per reference
(ymag   =                INDEF) Y scale of input picture in pixels per reference
(xrotati=                INDEF) X axis rotation in degrees
(yrotati=                INDEF) Y axis rotation in degrees
(xmin   =                INDEF) Minimum reference x value of output picture
(xmax   =                INDEF) Maximum reference x value of output picture
(ymin   =                INDEF) Minimum reference y value of output picture
(ymax   =                INDEF) Maximum reference y value of output picture
(xscale =                   1.) X scale of output picture in reference units per
(yscale =                   1.) Y scale of output picture in reference units per
(ncols  =                INDEF) Number of columns in the output picture
(nlines =                INDEF) Number of lines in the output picture
(xsample=                   1.) Coordinate surface sampling interval in x
(ysample=                   1.) Coordinate surface sampling interval in y
(interpo=                linear) Interpolant
(boundar=               nearest) Boundary extension (nearest,constant,reflect,wra
(constan=                   0.) Constant boundary extension
(fluxcon=                  yes) Preserve image flux?
(nxblock=                  512) X dimension of working block size in pixels
(nyblock=                  512) Y dimension of working block size in pixels
(verbose=                  yes) Print messages about the progress of the task
(mode   =                   ql)
```

geomap の実行は、

```
im> geomap trans.dat tranpar 1 320 1 240
```

これで画像変換のパラメータが tranpar にかきこまれたので、geotram で画像変換する。画像変換の必要なファイルは、天体および標準星 (検出器差引してフラットで割ったもの)、波長更正に使ったスカイ (skyimg)、マスク画像である。スカイは変換後の波長更正に使い、マスク画像は変換によってバッドピクセルの影響が広がるので、バッドピクセルを定義し直すためである。IRAF は拡張子 .fits がついていないと受け付けないのと、4 次元画像を読み込ませるには、明示的に範囲指定が必要であるところが注意点である。skyimg を例にとると、実際のコマンドは、

```
im> geotran skyimg.fits[1:320,1:240,1,1] skyimg.transf.fits transpar trans.dat
```

1 つ目と 2 つ目の引数は、@filelist という形でも書ける。

4. 波長更正

画像変換が終了したら、まず点源の画像に q_startrace をかけ、空間一定軸が x 軸に平行になっていることを確認する。ただし、IRAF を通したあとの画像は 2 次元になっているが、一部の q_シリーズは 4 次元データしか受け付けないため、次元を変更する必要がある。

```
q_chgaxis 4 object.transf.fits object.transf.fits.4
```

次に、skyimg.transf.fits に波長更正を行ない、波長一定軸が y に平行になっていることを確認するとともに、aa, bb で大まかに与えた波長更正式のパラメータを最終的に決定する。さらに、画像変換によって、バッドピクセルが広がったので、適当な閾値を決め、マスク画像を定義し直す。つまり、

```
q_2val mask.transf.fits newmask.fits 0.99 lower
```

のようにする。閾値はここでは 0.99 としているが、実際に画像を見ながら判断する。

スカイの引き残しの処理

理想的には chopping によってスカイがきれいにひけているはずだが、現実問題として chopping 周波数がスカイの変動に追いついていない時があり、スカイのひきのこしが chopping 差し引き画像でも残ってしまっていることが多々ある。ここまでの処理で画像の直交化 (横軸：波長、縦軸：空間) ができているので、ここで天体の近傍の、天体からのシグナルがのっていない部分から「ひきのこしスカイ」成分を推定して、スカイのひきのこしを補正する。具体的には、縦の空間方向 (波長一定) で median をとり、それをひくことでスカイのひき残しを除去する。

```
s_submedrow TWHya.pos1.Fl.transf.fits 1 320 30 240 TWHya.pos1.Fl.transf.subsky.fits
```

スカイのひきのこしを補正した TWHya.pos1.Fl.transf.subsky.fits というファイルができた。

5.3.6 天体のスペクトルを求める

このあとの処理の流れは、

- 標準星
  スペクトルを切り出し、1 次元化、平均化
  それをテンプレートで割り算して、装置の特性を含む大気のスペクトルを得る。
- 点源天体
  スペクトルを切り出し、1 次元化、平均化
  それを、標準星から求めた大気スペクトルで割って、真のスペクトルを得る。
- diffuse 天体
  空間方向にずらして足せる画像は足す
  標準星から求めた大気スペクトルで割って、真のスペクトルを得る。
  必要な空間位置のスペクトルを随時切り出す。
  *どれを先にやってもよい

のようになる (図 5.5 も参照)。

スペクトルの切り出し、1 次元化 (点源天体、標準星)

空間方向にアパーチャの幅をいくつかとって (たとえば、3, 5, 7,9pix) 切り出し、スペクトルの S/N がもっともよいものを採用する。ノイズは 天体のシグナルが入っていないスカイ領域の標準偏差を調べ、ノイズとする。具体的には、まず、例えば y=110–130 に天体その他のシグナルが無いとして、ここからノイズを見積もると、

```
q_list_stat TWHya.pos1.Fl.transf.subsky.fits 1 15-295 110:130 1
 | awk '{print $2,$6*sqrt(3)}' > TWHya.pos1.Fl.transf.subsky.noise3pix.dat
```

次に、天体のピークの y 座標を調べ、72 だったとすると、3 ピクセル幅で切り出す場合、y が 71–73 で切り出す。

```
q_list_stat TWHya.pos1.Fl.transf.subsky.fits 1 15-295 71:73 1 | awk '{print $2,$5*3}'
 | paste - TWHya.pos1.Fl.transf.subsky.noise3pix.dat | awk '{print $1,$2,$4}' > TWHya.pos1.Fl.transf.su
```

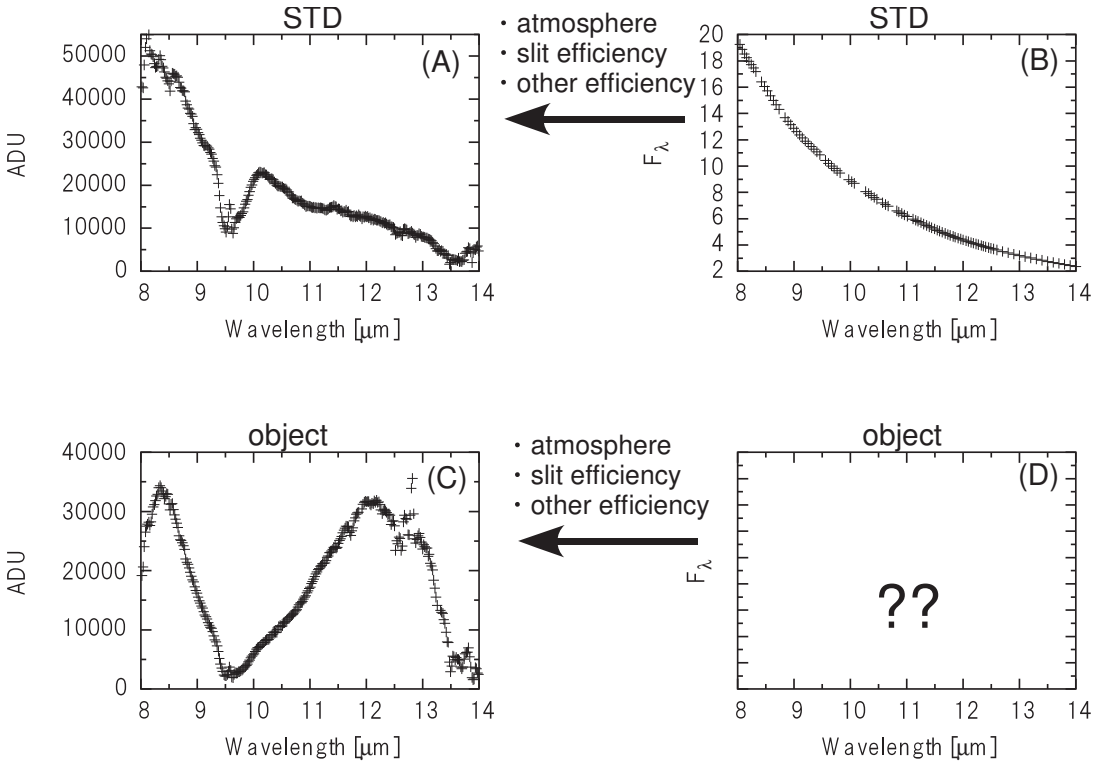

図 5.5: 標準星からスペクトルを得る原理。(A) ÷ (B) は、装置の特性を含む大気のスペクトル。標準星と天体がまったく同じスリット効率で観測されていれば、(D)=(C) ÷ [(A) ÷ (B)] で求められるが、実際にはスリット効率が異なるため、スケーリングが必要 (本文参照)。

ただし、マスク画像を見てこの範囲にバッドピクセルがある場合は、q_list_stat の対象からはずすなどの工夫が必要である。

これで、ファイル TWHya.pos1.Fl.transf.subsky.Signalcut3pix に x[pix]、シグナル [ADU]、ノイズ [ADU] が格納された。

このようにしてアパーチャの大きさを変えて切り出して、S/N が一番よい結果をスペクトルとして採用する。点源だとだいたい 3 ~ 5pix くらいである。これは、分光の空間方向の pixel scale が 0.165”/pix とすると 0.495” ~ 0.825” に相当する。

スペクトルの足しあわせ

上で述べたように、点源の場合は、切り出し方をそろえ、1 次元化したものを足せば良い。diffuse の場合は位置あわせをして足しあわせる。空間的な位置あわせは、スリットビューアに写っているほかの天体で行なうか、分光側のピーク検出で行なう。このとき、スリットビューア (撮像側) では 1pix=0.13”/pix なのに対し、分光側では 1pix=0.165”/pix であることに注意し、シフト量を決める。当然、この方法で足しあわせられるのは、スリットに沿って天体が移動している場合であり、スリットに垂直方向に大きく移動している場合は、異なるスリットポジションとして扱わなければならない。

shift & add の手法は基本的には撮像と同じで、波長方向、つまり x 方向にはシフトしないという違いだけである (5.2.4)。

また、この作業は大気吸収の補正前後どちらに行なってもよい。

大気吸収の補正

図 5.5 に示したように、得られた標準星と天体のスペクトルは、大気や装置の効率 (透過率 T_λ) の影響をうけている。理想的に T_λ が天体と標準星で同じとすると、

$$F_{\rm obsobj} = F_{\rm trueobj} \times T_\lambda, \quad F_{\rm obsstd} = F_{\rm truestd} \times T_\lambda$$

ここで、$F_{\rm truestd}$ が既知とすると、$F_{\rm obsobj}$, $F_{\rm obsstd}$ から $F_{\rm trueobj}$ を求めることができる。

$$F_{\rm trueobj} = F_{\rm obsobj}/F_{\rm obsstd} \times F_{\rm truestd}$$

よって、天体の観測スペクトルを標準星の観測スペクトルで割って、標準星の真のスペクトルをかければ、大気吸収等の影響を取り除いた天体のスペクトルが得られる (図 5.5 の (C) ÷ (A) × (B))。ただし、実際には COMICS はスリット分光器のため、点源の場合その光の全てがスリットに落ちるわけではなく、スリット効率が生じる。このスリット効率は、天体のスリットへの入り方で変わり、スリットが回折限界程度のために、波長によって星像の大きさが変わることから、スリット効率は波長依存性も持つ。さらに、chopping 観測により、星像がダンスしているとスリット効率は計算できるものではなくなってきてしまう。そのため、点源の場合でも、標準星と天体を撮ったときにスリット効率が異なり、また diffuse な天体ではそもそも標準星とはスリット効率が異なるので、さらに補正が必要となる。以下では、天体が点源と diffuse な場合に分けて詳述する。

なお、標準星の真のスペクトル ($F_{\rm truestd}$) に相当するデータが Cohen et al. (1999) によりテンプレートとしてまとめられており、提供されているので、それを用いる。テンプレートは、
http://canadia.ir.isas.jaxa.jp/comics/open/guide/index.html からリンクが張ってある、オンラインデータからとってくる。

[点源の場合]

点源の場合はすでに、これまでの解析で、天体・標準星それぞれの一次元化した観測スペクトル ($F_{\rm obsobj}$, $F_{\rm obsstd}$) が得られている。具体的には、それぞれ TWHya.pos1.subsky.SignalNoise3pix.dat と STD.pos1.subsky.SignalNoise3pix.dat というファイルだとすると、まず割り算をして、

```
paste TWHya.pos1.subsky.SignalNoise3pix.dat STD.pos1.subsky.SignalNoise3pix.dat
| awk '{print $1,$2/$5,$2/$5*sqrt(($3/$2)^2+($6/$5)^2) }' > TWHya.pos1.subsky.ratio3pix.dat
```

次に、上記ファイルはまだ pixel が波長に直ってないので波長に直す。画像変換時に pixel 波長関係は既に分かっているので、その関係式を使う。関係式 $\lambda[\mu{\rm m}] = 1.9900 \times 10^{-2} \times x + 7.5774$ だったとすると、

```
cat TWHya.pos1.subsky.ratio3pix.dat | awk '{print 1.9900e-2*$1+7.5774,$2,$3}'
> TWHya.pos1.subsky.ratio3pix_lambda.dat
```

テンプレートスペクトルをかけて、天体をスペクトルを得る。

```
x_template.pl TWHya.pos1.subsky.ratio3pix.dat HD75691.dat
  > TWHya.subsky.finalspc3pix.Wcm2um.dat
```

ただし、x_template.pl は、？。さらに、スリット効率が標準星と天体で異なっている効果を補正する。この補正には撮像の観測結果を用いる。まず撮像から天体のフラックスの積分値を求める。ここで、撮像はすでにカウントがフラックスに正しく変換されていると仮定し、例えば撮像が 2 バンドあれば、その値を F_{I1}, F_{I2} とする。一方、上で求めた天体のスペクトルから、各撮像バンドに対応する波長幅のフラックスを切り出し、その値を F_{S1}, F_{S2} とする。スリット効率が標準星と天体で一致していれば、$F_{I1} = F_{S1}$, $F_{I2} = F_{S2}$ となるはずであるが、実際には異なる。従って、分光に補正項 f を掛けて、$F_{I1} = F_{S1} \times f$, $F_{I2} = F_{S2} \times f$ となるように、f を求める。複数バンドあれば f を波長の 1 次関数として求めることもできる。

[**diffuse** 天体の場合]

diffuse 天体の場合は、点源のように 1 つだけスペクトルを切り出せばよいわけではないので、複雑になる。この段階で存在しているのは、標準星の 1 次元化したスペクトル $F_{\rm obsstd}$、標準星のテンプレート $F_{\rm truestd}$、前節の最後 (スカイ引き残し処理) まで終わった天体 (もしくはその後、shift & add まで終わった天体) のスペクトルである。

1. $F_{\rm obsstd}$ を $F_{\rm truestd}$ で割る。
   前者はまだピクセルが波長に直っていないが、画像変換時にピクセル波長関係は既に分かっているので、その関係式を使う。得られたスペクトルは、装置の効率などの特性を含む大気のスペクトルである。
2. 天体の画像を大気のスペクトルで割る。
   天体の画像は 2 次元のままなので、大気のスペクトルを空間方向に並べて 2 次元にし、これで割る。これにより、図 5.5 の (D) に対応する画像が空間情報を失わずに得られる。
3. スリット効率の補正
   この補正には撮像の観測結果を用いる。まずある撮像バンドについて、撮像画像から、分光でスリットをあてた位置でスリット幅分の画像を切り出し、フラックスの空間分布を求める。たとえば 2pix のスリットなら、$0.165'' \times 2 = 0.33''$ の幅なので、撮像では $0.33/0.13 = 2.538$pix になる。ここで、撮像はすでにカウントがフラックスに正しく変換されていると仮定する。一方、分光側からは、バンド幅に対応する波長幅のフラックスを切り出し、これも空間分布をプロットする。この 2 つの空間分布の相関をとることで、撮像と分光でのフラックスの比 F_{I1}/F_{S1} を求める。同じことを複数のバンドについて行なう。そして、分光に補正項 f を掛けて、$F_{I1} = F_{S1} \times f$, $F_{I2} = F_{S2} \times f$ などとなるように、f を求める。diffuse の場合、スリット効率はほぼ 1 と考えられるので、f は普通、波長依存性をもつ。従って、2 バンド以上の撮像観測を行ない、波長に対して 1 次式で f を求めるのが望ましい。

5.4 考えられる質問など

5.4.1 ozone at 9.6μm の評価

やってみるとよくわかりますが、9.3–10.0μm のあたりは、地球高層大気のオゾンによる吸収バンドの影響で、きれいに割れません。観測の際に、標準星・天体のエアマスがを良くあわせていれば、比較的きれいに割れたりしますが、それでもどうしてもきれいに割れないときがあります。そればかりはどうしようもありません。しかし、エアマスがあってなくて 9.3–10.0μm のあたりに系統的に盛り上がり、またはへこみが見られるなら、エアマスミスマッチによると考えられます。この影響はそれなりに (あくまでそれなりですが) 補正することができます。具体的には ATRAN で天体、標準星の観測した仰角における大気透過率を計算することで、$\sim 9.6\mu$m 近辺が系統的にどのように出っぱる/引っ込むかを計算できます。これをつかってスペクトルを補正してやればいいのです。もちろん、ATRAN に与えるパラメータ (可降水量は？レイヤーの数は？) など細かい指定項目はありますが、正確な値は分からないので、とりあえず標準的なパラメータを用いればよいでしょう (よりよいパラメータの与え方、考え方がある方は教えてください)。このやり方でもオゾンの吸収バンドのあたりは十分に補正はできないので、このへんの波長帯は地上 10μm 分光観測の鬼門といえるでしょう。

5.4.2 Nodding はしなくてもいいのですか?

標準的な中間赤外の観測では副鏡 chopping に加え、nodding をして 4 組の観測データを 1 セットとして解析をします。それは、副鏡 chopping 観測のみだと、2 組のビームの光学系の configuration が異なるため、差し引きした後に背景放射の残存パターンが残ってしまうためです。これを Nodding 観測で除去します。しかし、COMICS+SUBARU の場合、望遠鏡等の背景放射が低く、この残存パターンの強度はあまり強くありません。よって、この残存パターン強度よりも天体からのシグナルが十分に明るい場合、**chopping** のみで十分観測できます。具体的には天体の明るさが○ mJy/arcsec^2 より十分明るければ、chopping のみで十分なのではないでしょうか? もちろん、この明るさ程度以下の天体を観測する場合には Nodding をする必要があります。

5.4.3 N 低分散分光でゴーストがあるんですが...

はい、そのとおりです。ゴーストが乗ってしまった部分は残念ながらデータとして使うのは難しいと思います。なお、このゴーストは撮像フィルタを” 穴” にすると出ないようなので、今後分光をする際には穴にしてください。この場合スリットビュワー (撮像画像) をさちらないようにするため、ND をいっぱいかけたり、読みだし領域をせまくするなどの処置が必要ですのでご注意を。

5.4.4 geotran で変換しようとするとエラーが出るのですが...

インプットファイルの次元がうまく認識されていないせいであることが多いです。その場合、3 次元 FITS に直してもうまくいかないので、インプットファイルのあとに空白をあけず [1:320,1:240,1] と明示的に示すと解決します。逆に、4 次元ファイルのままでも、[1:320,1:240,1,1] と明示的に示せば認識されます。

5.4.5 geomap 関連

何度も geomap をすると、作成される データベースファイル (ここでは tranpar) におなじキーワードでかきこまれてしまうので、あらためて変換作業をするときは、削除して (別名保存でも可) やるといいでしょう。

5.4.6 q_startrace が時間がかかってしょうがない

天体のシグナル値が大きかったりしませんか ?(標準星画像など) 画像を適当な値 (100 など) で割ってみて、値を小さくした画像を作って、それで trace してみてください。また、スカイが強く、天体のシグナルが有意に

受かっていない x の列では、iteration の上限までプログラムがまわってしまい、時間がかかりますので、そのような x をあらかじめ避けて q_startrace を実行させるとよいでしょう。