

COMICS DATA REDUCTION MANUAL Ver.2.1

2007 年 10 月 9 日

目次

1	INTRODUCTION OF COMICS	6
1.1	Mid-Infrared Astronomy	6
1.2	装置概要	6
2	COMICS Data Set	8
2.1	‘chop and nod’ と生データの構成	8
2.2	解析の流れ	11
3	FITS FILE AND HEADER	15
3.1	1-8 行目	15
3.2	すばる共通ヘッダ	16
3.2.1	望遠鏡に関するパラメータ	16
3.2.2	光学系のセッティングに関するパラメータ	16
3.3	COMICS 固有ヘッダ	17
4	一次解析の方法: 手順 / コマンド一覧	19
4.1	ソフトウェアの準備	20
4.1.1	q_シリーズ	20
4.1.2	IRAF	20
4.2	撮像の解析: 方法まとめ	20
4.3	分光の解析: 方法まとめ	21
4.4	どれが使うデータなのか?	22
5	一次解析の方法: 詳説	23
5.1	撮像 (Nimg, Qimg) の解析	23
5.1.1	ダーク	23
5.1.2	フラットの作成	24
5.1.3	パッドピクセルのリストアップ	26
5.1.4	各画像ファイルの処理	28
5.1.5	画像の加算	29
5.1.6	その他	33
5.2	分光 (NL) の解析	34
5.2.1	ダークの準備	34
5.2.2	フラットの作成	34
5.2.3	読みだしパターンノイズの低減	36
5.2.4	各画像ファイルの処理	36
5.2.5	スペクトルの切りだし	41
5.2.6	スペクトルの足しあわせ	42
5.2.7	波長の当てはめ	42
5.2.8	大気吸収・効率の補正	42

5.2.9	Diffuse 天体の場合	43
5.3	考えられる質問など	45
5.3.1	ozone at $9.6\mu\text{m}$ の評価	45
5.3.2	Nodding はしなくてもいいのですか?	45
5.3.3	N 低分散分光でゴーストがあるんですが...	45
5.3.4	geotran で変換しようとするエラーが出るのですが...	45
5.3.5	geomap 関連	45
5.3.6	q_startrace が時間がかかってしょうがない	45

表一覧

1.1 COMICS の主な仕様	7
------------------------	---

目 次

2.1	COMICS で得られるデータ (chop and nod)	9
2.2	COMICS で得られるデータ (データファイルの内容)	10
2.3	chop and nod データの差引	12
2.4	分光画像における波長、空間方向の決定	14
5.1	ダーク画像作成手順	24
5.2	スカイフラット画像作成手順	27
5.3	q_badpix によるマスク画像作成	28
5.4	広がった天体の位置合わせの手法	30
5.5	撮像観測データの処理	32
5.6	分光解析の流れ (低分散分光点源の例)	35
5.7	波長ピクセル関係	37
5.8	空間一定線とそのフィッティング結果の例	38
5.9	標準星からスペクトルを得る原理	43

改訂履歴

2001/05/24	Ver. 0.0	Yoshiko K. Okamoto	最初のバージョンリリース
2004/11/13	Ver. 1.1 β	Mitsuhiko Honda / Yoko Okada	改定
2007/09/24	Ver. 2.0	Takashi Miyata	内容を整理
2007/10/09	Ver. 2.1	Takafumi Kamizuka	細部修正・整理

第 1 章

INTRODUCTION OF COMICS

1.1 Mid-Infrared Astronomy

中間赤外線とは、波長が $5\sim 30\mu\text{m}$ 程度の赤外線である。中間赤外線域には 2 つの大気の窓 (N, Q バンド) 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ー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 ($\sim 5\sim 30\mu\text{m}$) は、黒体では $100\sim 400\text{K}$ 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には中間赤外線による観測が重要である。たとえば $9.7\mu\text{m}$ 、 $18\mu\text{m}$ 付近には、シリケー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 , $12.8\mu\text{m}$ 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 $\sim 0.13''/\text{pix}$ (撮像の場合) に設計されている。分光モードでは、 $10\mu\text{m}$ 帯については、波長分解能が $R\sim 250$, 2500 , 10000 の低分散、中分散、高分散モード、 $20\mu\text{m}$ 帯については、 $R\sim 2500$, 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、 $8\sim 28\mu\text{m}$ まで感度のあるアメリカ Hughes 社 Santa Barbara Research Center 製の、Si:As 320×240 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。すきまのあけ方をうまくとって、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ま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。10 μm 帯と20 μm 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。

	撮像	分光
ピクセルスケール	0.130"/pix	0.165"/pix
検出器	320x240 Si:As \times 1	320x240 Si:As \times 5
視野	42" \times 31"	ロングスリット、40"
観測波長	N:8.8–12.4 μm (5バンド) UIR8.6, 11.24, [ArIII], [SIV], [NeII] の narrow band Q:17.7–24.5 μm (4バンド)	N: 7.8–13.3 μm Q: 16.7–20.7 μm
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

表 1.1: COMICS の主な仕様

常温では10 μm 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 2.2 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、おおもとは A~D の 4 枚で 1 組の画像データを読み出ししている。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、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 2.2 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, \dots, 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 ($\sum_i A_j^i$)、もしくは、複数のままの生画像 ($A_j^1, A_j^2, A_j^3, \dots, A_j^m$) 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。

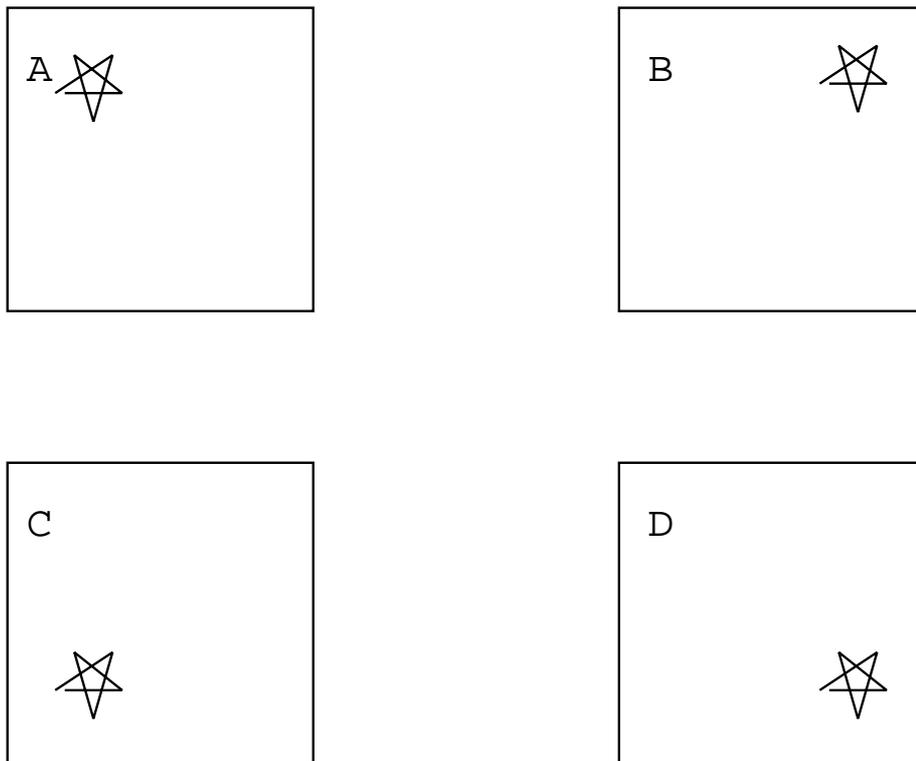
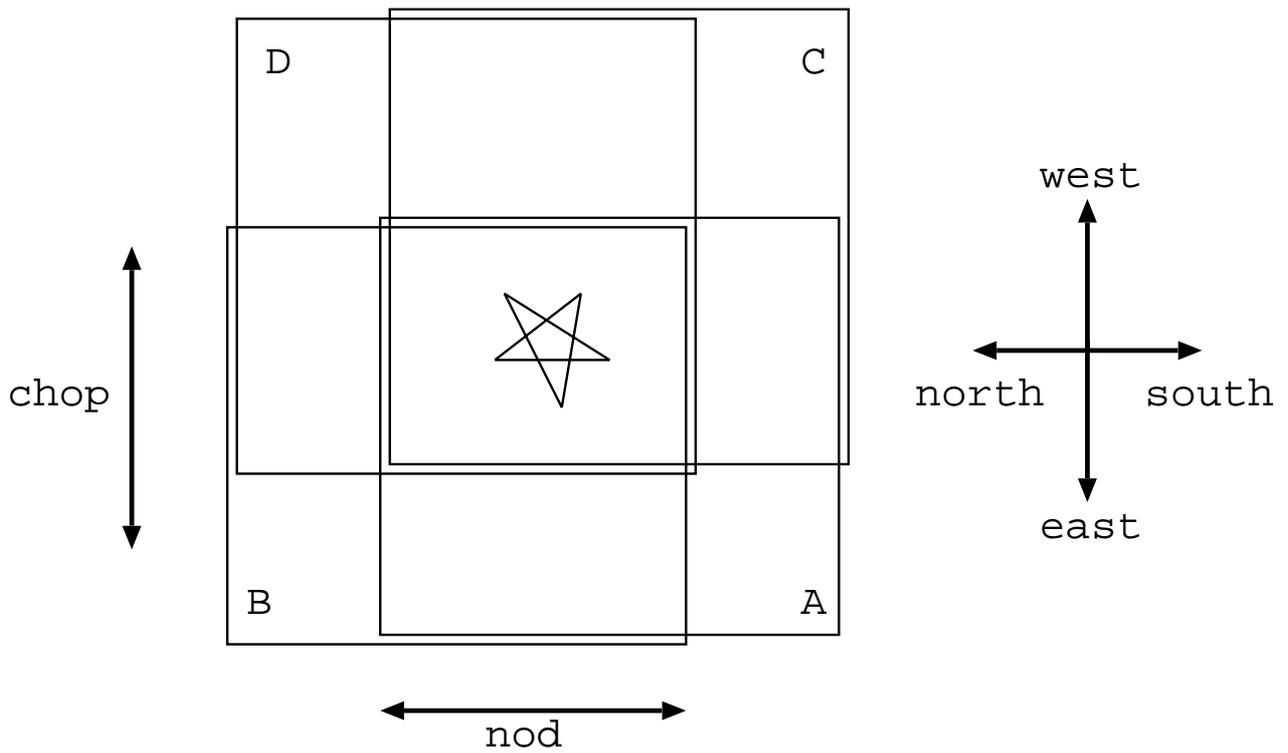


図 2.1: COMICS で得られるデータ : 天体に対して少しずつ位置をずらして ‘chop and nod’ を行うことで、A~D の 4 枚で 1 組の画像データが得られる。(chop,nod の方向は実際には任意。) A,B,C,D のそれぞれは図 2.2に示すようにさらに複数の画像からなる。

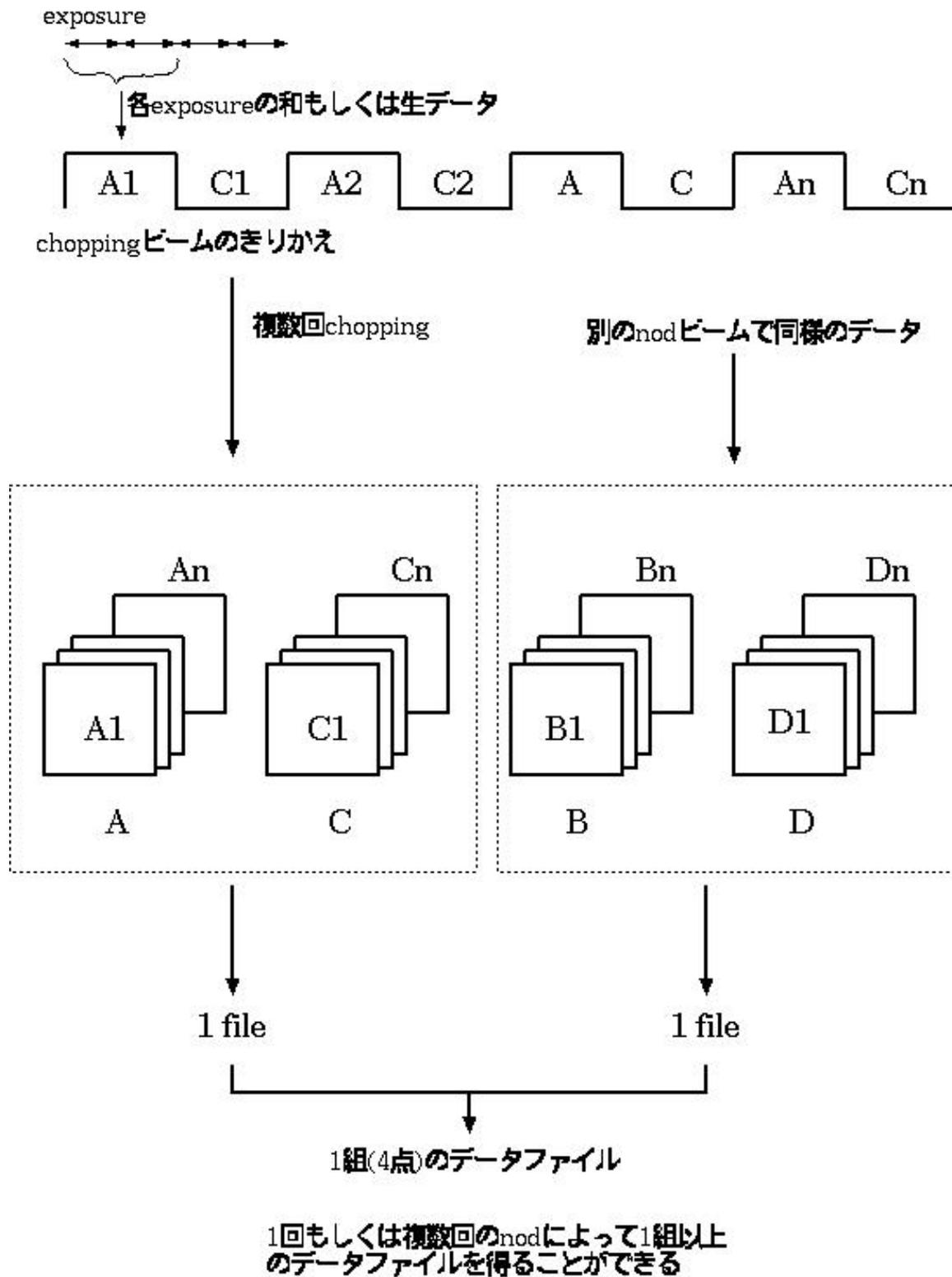


図 2.2: COMICS で得られるデータ: 図 2.1に示した、各 chop, nod ビームの画像は、通常、さらに複数の画像からなる。これは、各 nod ビームにおいて、複数回 chop をおこなうためである。各 chop ビームでの画像はさらに、複数回の読みだしに伴う複数枚の画像の和、もしくは生データになっている。

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。

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 ごとの画像のまとめ	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、 $\sum_j A_i^j, \sum_j C_i^j$

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、 $\sum_{i,j} A_i^j, \sum_{i,j} C_i^j$

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 2.2 で、

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

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

として、chop 差引をした 2 枚の画像 α, β を作る (図 2.3)。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。

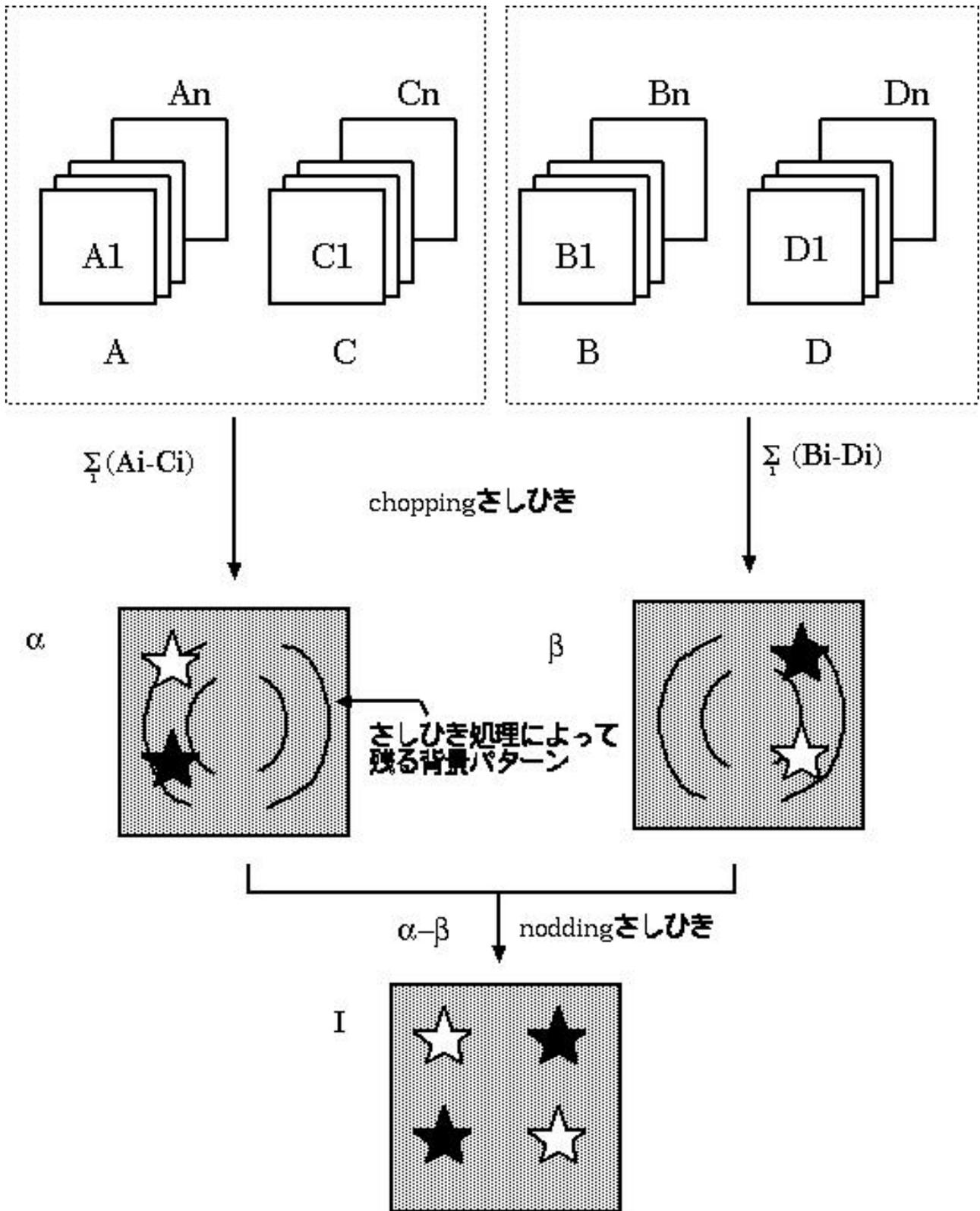


図 2.3: chop and nod データの差引：観測の結果得られた 4 枚 1 組の画像データを、まず、同 nod beam、異 chop beam の画像の差引を行う (A,C α 、B,D β ; chop 差引)。次に残存パターンを除去するために chop 差引でできた 2 枚の画像の差引を行う (α, β I)。天体のうち、カウントが正で残る部分 (白) と負になって残る部分 (黒) がある。

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 2.4）。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取り、スカイのスペクトル画像が求まる。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。

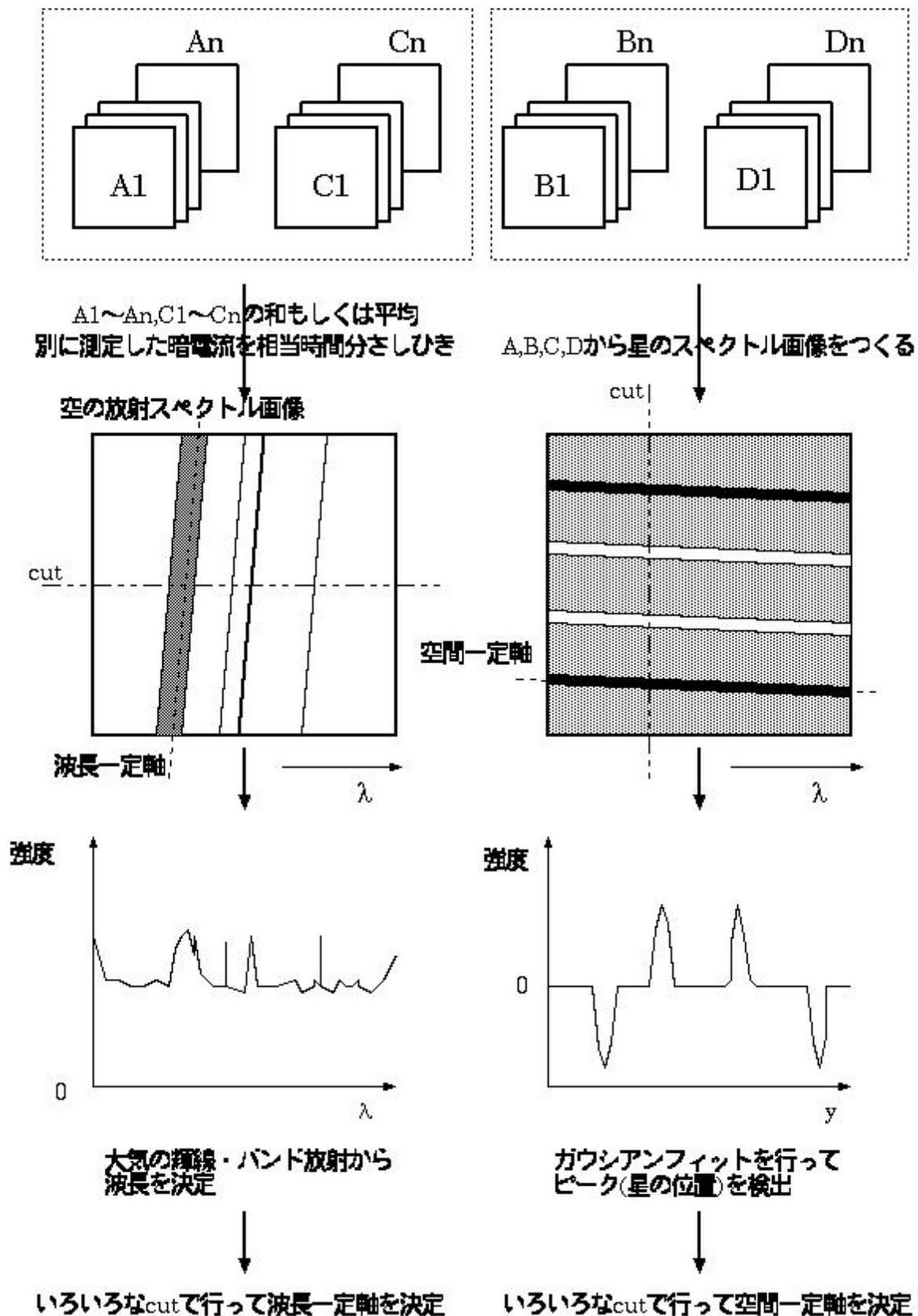


図 2.4: 分光画像における波長、空間方向の決定: 波長一定軸については、生データを足し合わせて大気の放射スペクトル画像を作り、大気透過率モデルと比較することで波長同定を行う。空間一定軸については、星のスペクトル画像から、波長方向の検出器軸に沿った断面についてガウシアンフィットを行ってピークを検出して決定する。

第 3 章

FITS FILE AND HEADER

COMICS で取得した画像は、FITS ファイル形式によって 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、バージョンが一番下の方の、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、サポートサイエンティストに問い合わせのこと。

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がたくさんある。座標の値は、本当の天球上の位置とはずれがあり、トラッキング中もそんなに精度があるものではないので、これをもとに画像の足しあわせなどを行なうことはできない。また、chopping 振幅が 30" 以下の場合、オンビーム方向と望遠鏡の指向方向が一致するが、30" を超える振幅で chopping を行なっている場合、オンビーム、オフビームとも副鏡が傾いた状態になり、望遠鏡の指向方向ではデータを取らなくなるため、その意味でも FITS ヘッダの座標は正しくなくなる。

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

から、COMICSの光学系関係のヘッダが続く。

```
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(pixel)
SLTCPIX2=         160.0 / Slit center projected on detector(pixel)

```

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である。

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 等別のソフトウェアに通す（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」の段階で解析データのリストのようなものを作成しておく、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 ソフトウェアの準備

本マニュアルでは解析を 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
- IRAF

である。また、awk や perl などのスクリプト言語を使用するため、これに関する知識も必要となる。

4.1.1 q_シリーズ

q_シリーズは <http://canadia.ir.isas.ac.jp/comics/open/rbin/rbin.html> から取得可能である。2007 年 10 月現在、最新版は version 30 である。

q_シリーズのソースファイル (rbin.tgz) を取得したら、適当な場所で展開する。展開するとディレクトリ (rbin.030/) が作成される。そのなかの 1_README にインストール方法が記述されているので、それを参照。

以後本マニュアルでは q_シリーズのコマンドはパス無しで記述する。したがって、インストールした dir(rbin.030/) に対してパスを切っておく必要があるので注意。

4.1.2 IRAF

IRAF については様々な場所でインストール方法が述べられているのでここでは割愛する。

4.2 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 (スカイフラット)	天体生画像 (スカイ) からダーク差し引き チョップビームごとに画像を分離 frame 間統計処理、file 間統計処理 ガウシアン平均、規格化	q_arith q_bsep q_list_stat IRAF:gauss, q_arith
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、 標準星データの解析	チョップ差し引き パターンノイズ除去 フラットで割る shift & add 標準星のカウントをはかる 1 カウントあたりのフラックス値を求める	COMQ 画像 q_subch q_arith q_arith, q_fcombine, IRAF:imshift q_photo or IRAF:imexamine

4.3 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	パターンノイズ除去	q_subch
3. 分光用フラットの作成	(ドーム) - (ダーク) 作成 パターン参照検出器差引 ガウシアン平均, 規格化	q_arith s_subch IRAF:gauss, q_arith
4. 天体データ、 標準星データの解析	チョップ差引 フラットで割る	COMQ 画像 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 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 3) フラットで割る 自動波長較正 空間一定線検出 (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	COMA 画像から作成 q_arith q_list_stat q_arith q_sky_nlow(NL のみ) q_startrace q_transtable2
(b) 変換	(a) の対応表に基づき変換を求める 天体、スカイ、マスクを変換	IRAF: geomap 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 (b) の変換結果で空間一定線検出 (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)	q_sky_nlow q_startrace
(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, IRAF:imshift
5. 標準星による大気補正	スペクトル一次元化 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	q_list_stat
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 大気スペクトルを二次元画像化 天体を大気スペクトルの二次元画像で割る	q_list_stat q_mkimg q_arith

4.4 どれが使うデータなのか？

解析の下準備として、解析対象のファイルを正しく ID する必要がある。

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、以下の情報をまとめたものを作成するとよい。

- 天体名
- 画像の番号
- クロック
- 分光、撮像の別、各フィルター
- 望遠鏡の位置、InstPA などの情報
- chopping パラメータ

これには使用するデータだけを抽出し、試し取りなどのデータを含まないようにするとすっきりする。

この作成は基本的に観測メモを基に行うのが簡単であるが、メモが不完全だったりアーカイブデータを使用している場合などは、そうもいかない。このような場合でも FITS HEADER には全ての情報が網羅されているので、これから情報を抽出していけば上のようなメモは作成可能である。

ただし、全てのファイルについて HEADER を全て見るのはたいへんな作業となる。このような場合に Header 情報をまとめるコマンドが `q_` シリーズの `q_headlst2` である。

リストを作りたい画像ファイルを 1 行に 1 ファイルずつ書いたファイルを準備する。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
```

とすればよい。（もちろん手書きでリストを作成しても可）。これに対して

```
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
```

などとすれば `*clk,opt,temp,tel1,tel2` に必要な情報が書き込まれる。あとはこれを眺めて必要なファイルを抽出すれば良い。

第 5 章

一次解析の方法: 詳説

5.1 撮像 (Nimg, Qimg) の解析

5.1.1 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するのは結局、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 51219, 51221 の画像から、撮像ダークを作成する場合を考える。

画像 No.	クロック	できたダーク (注)
51219,51221	PP=30, ND=1, Nexp=163, CoAdd=1, Ystart=1, chop=yes	imgdark30_1

注: imgdark30_1: PP=30, 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 (m51219,m51221) を、q_fcombine でファイル間平均 (ave) をとる。もともとの COMA00051219 等の画像では、各 frame 163 exposure され、CoAdd=1 で和が求められているので、平均画像も 163 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 ../DATA/COMA00051219.fits 1 - - : m51219
q_list_stat ../DATA/COMA00051221.fits 1 - - : m51221
q_fcombine m51219 m51221 ave=imgdark30
q_arith imgdark30 / 163 imgdark30_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 のクロックの組み合わせが同じものである。

解析中には様々なクロックに対してダークを作成することになるので、作成したダークファイルがごちゃごちゃにならないよう、整理しておくこと。

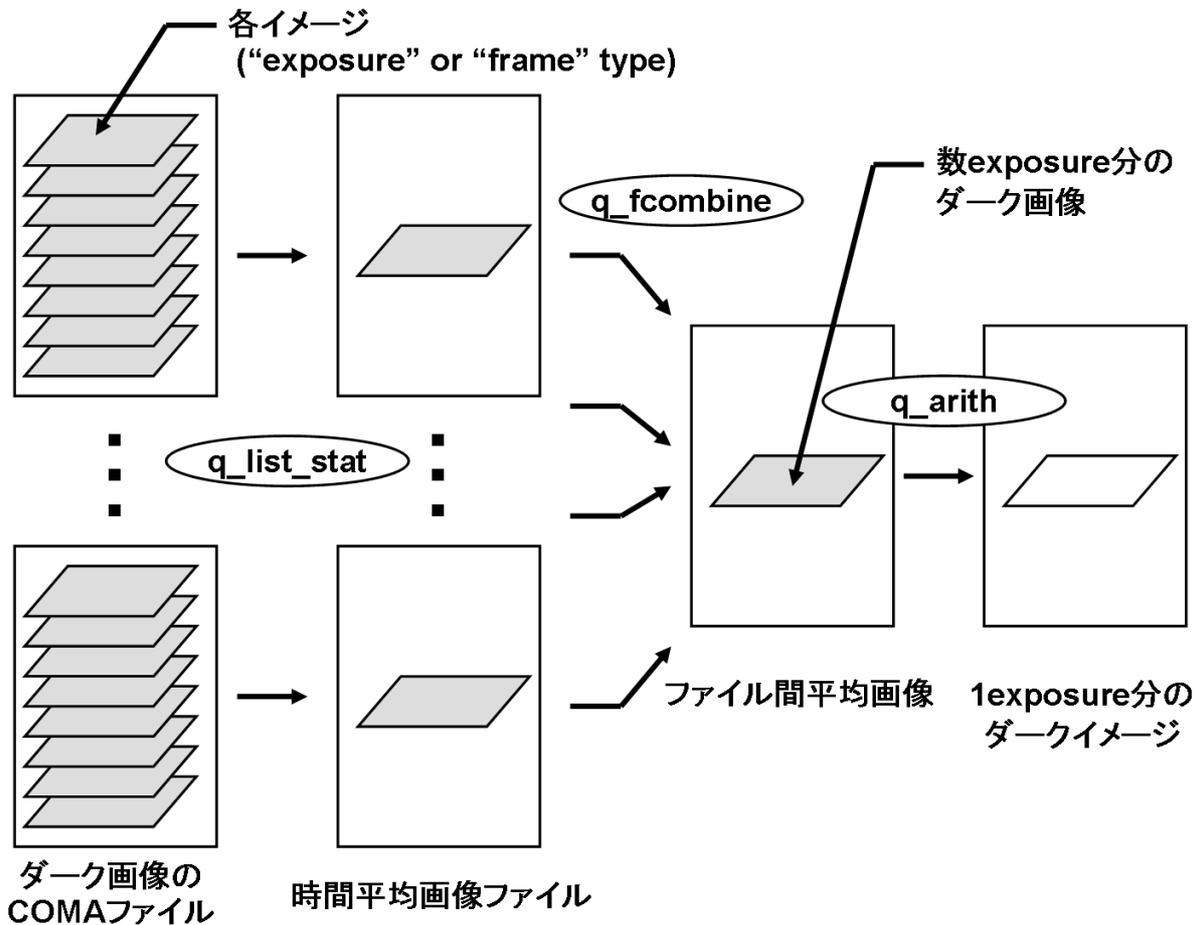


図 5.1: ダーク画像作成手順: 同クロックのダーク画像を全て平均し、最後に 1exposure 分のダークに変換する。ダークの減算に使用する際は、対象となるイメージの exposure 数にあわせて用いる。

5.1.2 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用いず¹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話を進める。

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/スリットビューワ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。

原理的には同じフィルター同じクロックで取ったデータがあれば、それを別時間のフラットとして用いることができるはずである。しかし実際は望遠鏡姿勢によって光学系に微小なずれがおきるため、これは不可能である。したがって、データごとに off-beam sky を用いてフラットを作成する必要がある。

また、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

¹撮像でドームを取ると saturate してしまうのでドームフラットは使えない

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。

0. 撮像で解析するデータは以下の 2 ファイルであるとする。

```
../DATA/COMA00050615.fits
../DATA/COMA00050617.fits
```

1. COMA 画像に対してダークの減算を実施、スカイ画像を作成。

まず解析対象となるデータの Coadd 数 (Nexp) を求める。Header を見て Q_CHEB を確認するのが確実。今の場合、Nexp が 16 であったとする。すると差引を行う dark も 16 枚 exposure を加算したものを使わなければならない。これまでに 1exp 分の dark は作成しているはずなので、これを 16 倍し、差引を行う。

```
q_arith imgdark30_1 \* 16 imgdark30_16      (\* で乗算を示す。ワイルドカードの * と区別)
q_arith ../DATA/COMA00050615.fits - imgdark30_16 sky50615.fits
q_arith ../DATA/COMA00050617.fits - imgdark30_16 sky50617.fits
```

q_arith は引き算元のデータが $Z > 1$, 引き算するデータが $Z = 1$ の場合、全ての Z について引き算を実施してくれるのでこれで全ての frame に対して引き算がなされたことになる。sky50615.fits, sky50617.fits がダーク差引後の画像。

2. ビーム毎に画像を分け、さらにビーム毎に平均化。

現段階では sky50615.fits には chopping beam 両方のデータが入っている。これを chopping beam ごとにわけて画像をつくる。これには q_bsep というコマンドを使用する。これは COMICS データの header を元に、beam ごとにファイルを作成するプログラムである。

```
q_bsep sky50615.fits sky50615_p.fits sky50615_n.fits
q_bsep sky50617.fits sky50617_p.fits sky50617_n.fits
```

ここでは sky50615_p.fits が chopping beam-A, sky50615_n.fits が B だけのファイルとなる。Header を見れば、NAXIS3 が sky50615_p.fits, sky50615_n.fits は sky50615.fits に対して半分になっているはずである。

これを平均する。平均には q_list_stat を用いる。

```
q_list_stat sky50615_p.fits 1 - - : sky50615_pa.fits
q_list_stat sky50615_n.fits 1 - - : sky50615_na.fits
q_list_stat sky50617_p.fits 1 - - : sky50617_pa.fits
q_list_stat sky50617_n.fits 1 - - : sky50617_na.fits
```

2. Gaussian で平均化

上にも述べた通りここまでで作成した画像は大きなパターンを含んでおり、これを取り除かなければ本当の Flat にはならない。そのためには、上の画像に gaussian フィルターをかけ、それで割算をするという作業を行う。

gaussian フィルターを通した画像は IRAF の gauss というタスクを用いて行う。

```
cl> gauss sky50615_na.fits[, ,1,1] sky50615_naG.fits 6
cl> gauss sky50615_pa.fits[, ,1,1] sky50615_paG.fits 6
cl> gauss sky50617_na.fits[, ,1,1] sky50617_naG.fits 6
cl> gauss sky50617_pa.fits[, ,1,1] sky50617_paG.fits 6
```

gauss コマンドの最後の 6 はガウシアン幅を示しており、6pix のガウシアンでスムージングをかけた画像 (sky50615_nG.fits) が結果として得られる (6pix という値は経験からの推奨値)。

つぎに Gaussian 前の画像を gaussian 後の画像で割る。

```
q_arith sky50615_na.fits / sky50615_naG.fits sky50615_naF.fits
q_arith sky50615_pa.fits / sky50615_paG.fits sky50615_paF.fits
q_arith sky50617_na.fits / sky50617_naG.fits sky50617_naF.fits
q_arith sky50617_pa.fits / sky50617_paG.fits sky50617_paF.fits
```

sky50615_naF.fits などが得られた Flat 画像である。

5.1.3 バッドピクセルのリストアップ

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 を入れた画像を作成する。たとえば、各フラット画像で、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）を取り出したい時には

```
q_badpix sky50615_naF.fits 0.8 1.2 sky50615_naF_bp.fits
q_badpix sky50615_paF.fits 0.8 1.2 sky50615_paF_bp.fits
q_badpix sky50617_naF.fits 0.8 1.2 sky50617_naF_bp.fits
q_badpix sky50617_paF.fits 0.8 1.2 sky50617_paF_bp.fits
```

とすればよい。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、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。このような端の部分に入った天体を解析する場合には処理画像を見ながら個別対応すること。

マスク画像の作成

以上からバッドピクセルのマスク画像が完成した。この画像はバッドピクセルに 0 を、それ以外に 1 を入れた画像になっている。これは、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。

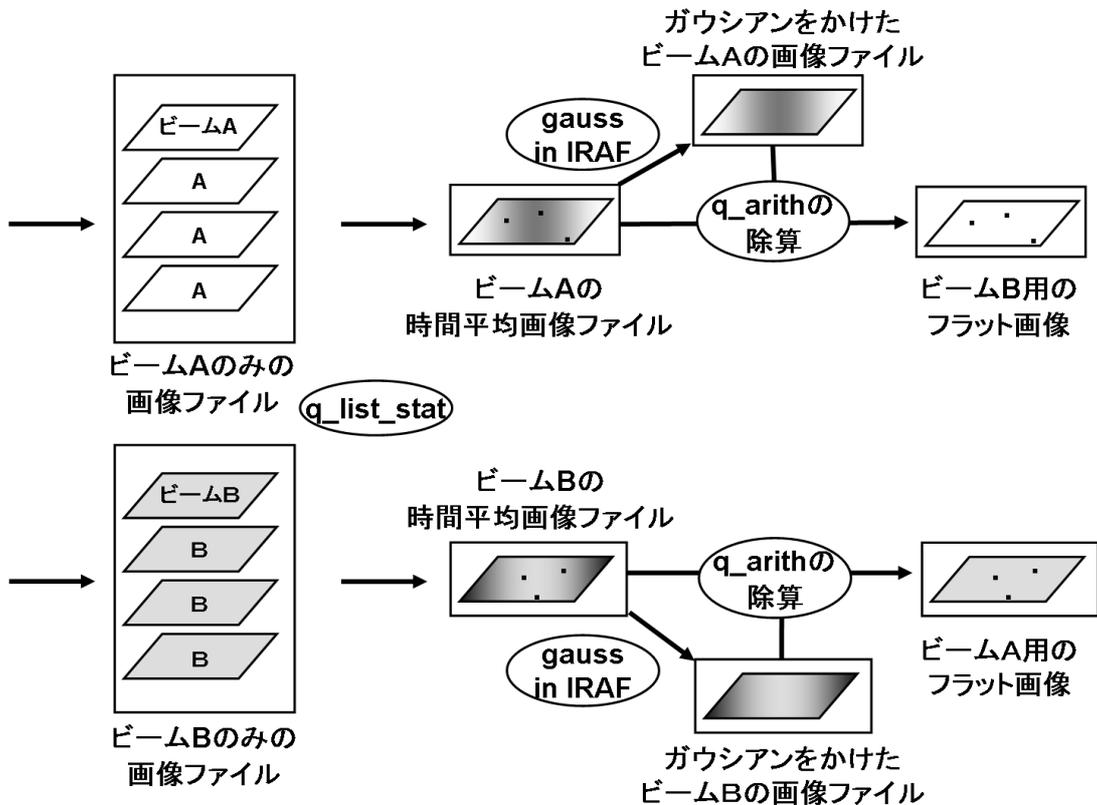
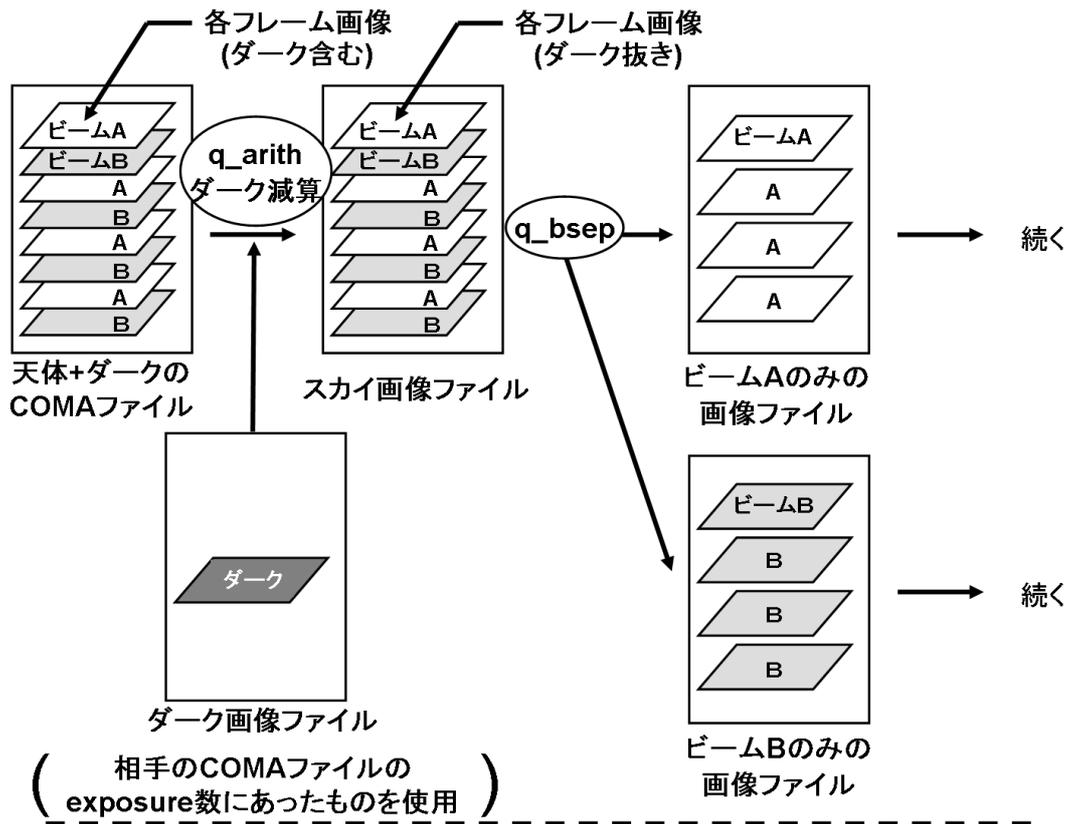


図 5.2: スカイフラット画像作成手順: ダーク減算・ビーム分割・平均化・大スケールの揺らぎの除去を経てフラット画像が得られる。一つのビームの画像から作ったフラット画像はもう一方のビームの画像に対するスカイフラットとなる。

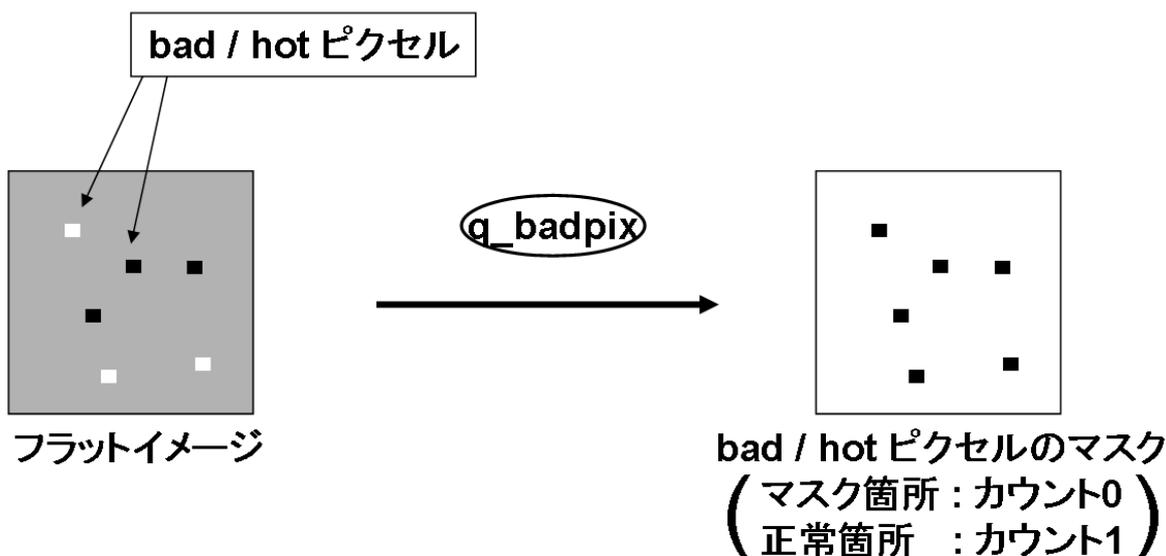


図 5.3: q_badpix によるマスク画像作成 : フラット画像上で確認される感度が著しく低い or 高い 箇所 (bad / hot ピクセル) を q_badpix によりマスクする。q_badpix は周囲の平均と比べて閾値の中におさまる物をカウント 0、閾値におさまらない物をカウント 1 とした画像を作成する。

5.1.4 各画像ファイルの処理

ここまででフラットおよびパッドピクセル画像の準備ができた。次は各データに対して画像処理を行う。

チョップ差引 (COMQ 画像)

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 画像が結果に相当しているので、通常は解析者がこの処理を行う必要は無い。

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

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。

読みだしパターンノイズの低減

COMICS 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。従って読みだし時にパターンを持って乗ってしまうノイズは 16 チャンネル全てに同様に乗ることになる。一方、観測天体は検出器の一部にしか乗っていないので、天体に乗っていない部分を使えばこのノイズを引くことができ、結果的にノイズを減らすことができる。

差引には q_subch というコマンドを使う。これは同時に読み込んだデータ点でメディアンを取り引き算を行ってくれるプログラムである。天体が画像に対して小さい場合には全てのチャンネルを用いれば良いので、単純に

```
q_subch ../DATA/COMQ00050615.fits obj50615.fits
```

とすればよい。もし天体が非常に大きく、ch のメディアンではパターンが残ってしまう場合には ch を直接指定することもできる。例えば ch1(画像で $X=1-20$) を参照して引き算する場合には

```
q_subch ../DATA/COMQ00050615.fits 1 obj50615.fits
```

とすればよい。ただしこの場合は”パターン”ノイズは引くことができるが、ランダムな”読みだし”ノイズは逆に増えてしまうことに注意。

フラット処理

チョップ差引画像 = COMQ 画像を、フラットで割る。

多くの場合 Chopping は検出器の範囲で行われており、COMQ 画像には positive の画像と negative の画像が写っているはずである。これらは使う Flat が異なるので別個のデータとして扱うべきであるので注意。

まず、positive で写っている画像についての処理。positive 側を考慮するので、beam-B(negative 側) で作った Flat で割った後、badpix の処理を行う。

```
q_arith obj50615.fits / sky50615_naF.fits obj50615_datP0.fits
q_arith obj50615_datP0.fits \* sky50615_naF_bp.fits obj50615_datP1.fits
```

negative 側も同様に処理する。ただし以後のことを考えて、-1 をかけ画像をプラスの画像にしておく。もちろん、negative 画像が視野内に入っていないデータの場合はここは無視して良い。

```
q_arith obj50615.fits / sky50615_paF.fits obj50615_datN0.fits
q_arith obj50615_datN0.fits \* sky50615_naF_bp.fits tmp.fits
q_arith tmp.fits \* -1 obj50615_datN1.fits
```

ここまでで、各画像ファイルに対する処理は終了した。結果としては画像ファイルごとに positive の解析結果と (両ビームとも視野内の場合) negative の解析結果が得られているはずである。

5.1.5 画像の加算

単純に加算できる場合

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。例えば短時間で連続して取った画像などはこのようにして処理しても良いであろうし、天体が見えない場合など単純に加算するしかないケースもあるであろう。

加算はこれまでよく用いて来た q_arith コマンドを繰り返せば実行できる。ただしファイル数が膨大な場合には面倒である。このような多数のファイルの加算 (本当は平均) を求めるコマンドが q_fcombine である。

q_fcombine を使うには、加算するファイルを 1 行ごとに書いたファイルを用意する必要がある。例えばこれを objlist という名前だとすると、

```
q_fcombine @objlist ave=objave.fits med=objmed.fits sig=objsig.fits
```

とすれば、平均画像 (objave.fits)、メディアン画像 (objmed.fits)、分散画像 (objsig.fits) を得ることができる。

空間分解能を出来るだけ高めたい観測の場合、時間が違うファイルを上のように重ねると天体の位置が微妙にずれていて分解能をそこなうことがある。1 ファイルで位置測定ができるような天体の場合は、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。

シフトアンドアド

画像の位置がずれていたり、positive と negative 画像を重ねて SN を稼ぐような場合にはシフトアンドアドを行うことが必要である。

1. 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

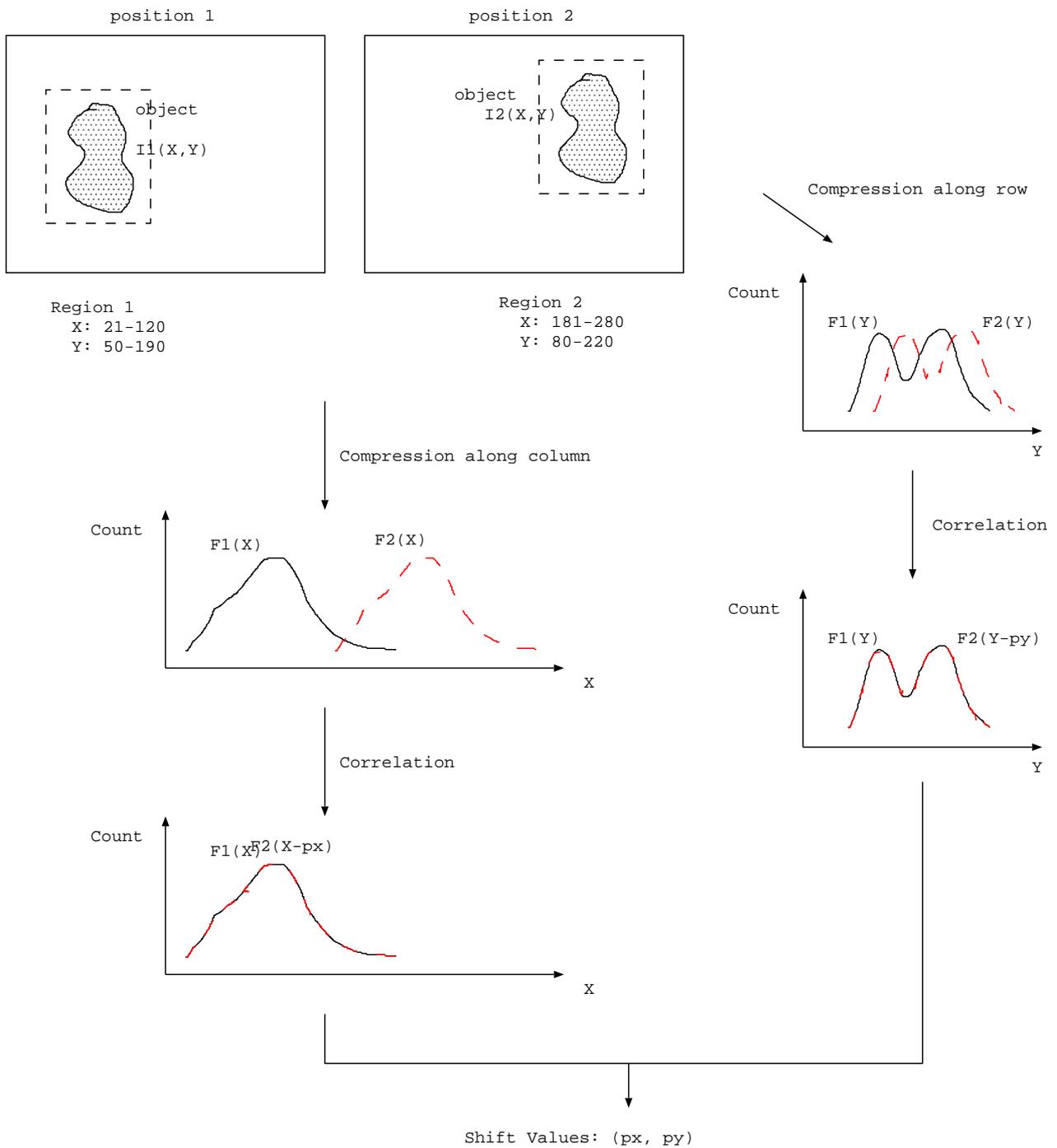


図 5.4: 広がった天体の位置合わせの手法

置ずれが決定できる)。この方法を図 5.1.5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必ずすべきである。

加算したい画像全てに対してシフト量を求め、メモしておく。例えばこれまで解析してきた 50615,50617 については以下ようになった。

```
obj50615_datP1.fits    0    0    基準
obj50615_datN1.fits -106.5 +0.8
obj5061_datP1.fits    -0.2 +0.8
obj5061_datN1.fits  +106.5 +0.8
```

2. 画像のシフトと平均

シフト量が求まったら、各画像をシフトして平均を求める。

画像のシフトには `imshift` を用いる。

```
c1> imshift obj50615_datP1.fits[:,1,1] obj50615_datP1s.fits 0 0
c1> imshift obj50615_datN1.fits[:,1,1] obj50615_datN1s.fits -106.5 0.8
c1> imshift obj50617_datP1.fits[:,1,1] obj50617_datP1s.fits -0.2 0.8
c1> imshift obj50617_datN1.fits[:,1,1] obj50617_datN1s.fits -106.5 0.8
```

最初の `obj50615_datP1.fits` に対する処理はシフト量が 0 なので本来はしなくても良いはずである。が、以後の処理でファイルの次元を合わせるためにこれが必要である。

これで重ね合わせの準備が整ったので、画像を平均する。平均は通常の平均を取れば良いが、もし画像内に bad pixel が多くありこれを消したい場合にはメディアン平均を用いた方が良い場合もある。どちらも `q_fcombine` で処理が可能である。

まず加算するファイル名を 1 行にひとつずつ記述したファイルを用意する。今これを `objlist` とすると、

```
q_fcombine @objlist ave=objave.fits med=objmed.fits sig=objsig.fits
```

とすることで平均 (`objave.fits`)、メディアン平均 (`objmed.fits`)、分散 (`objsig.fits`) が得られる。

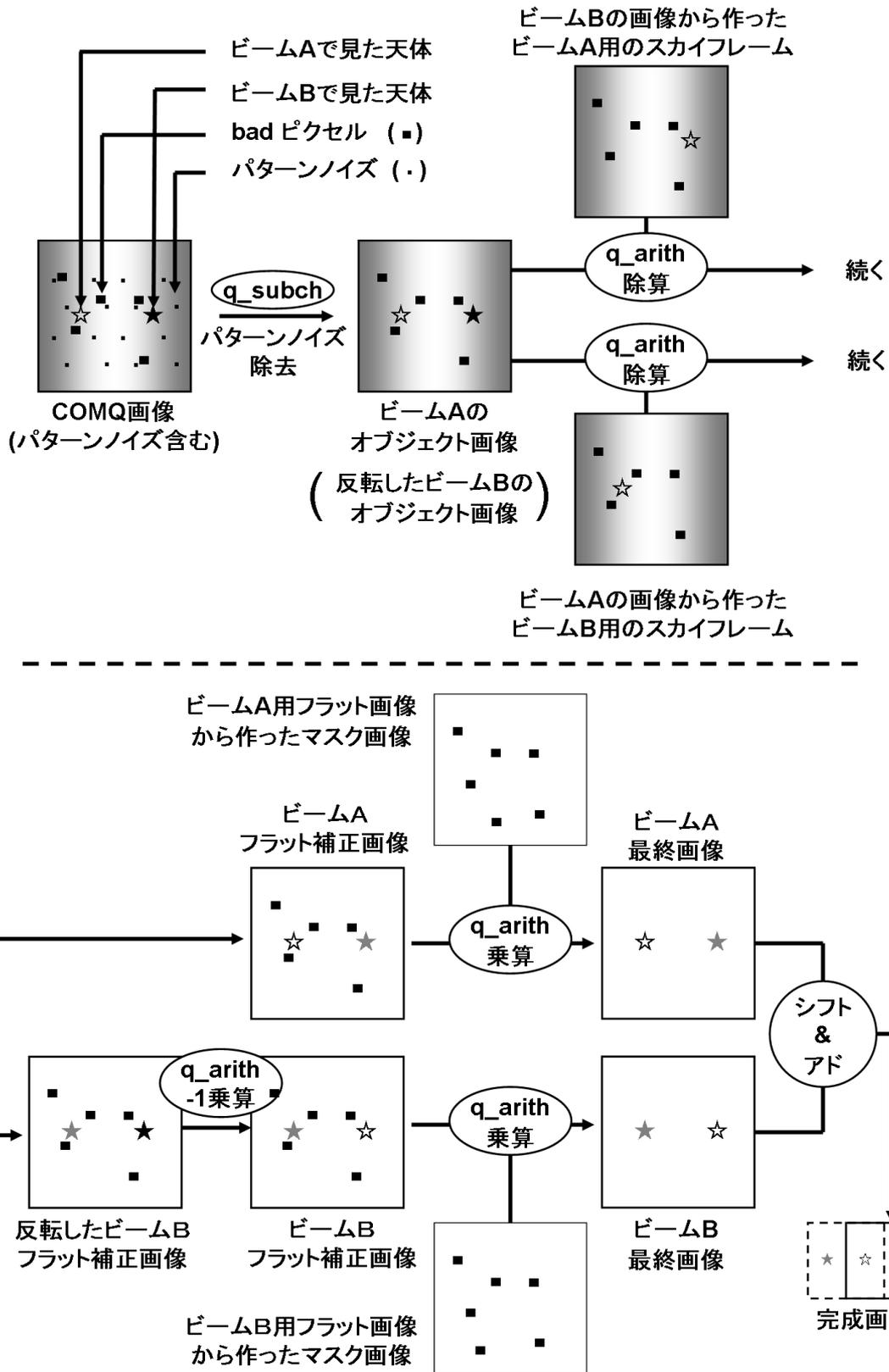


図 5.5: 撮像観測データの処理：作成したフラット画像を用いて COMQ 画像をフラット補正、バッドピクセルのマスク、その後各ファイルを位置あわせて加算平均を取り、最終的な画像とする。

5.1.6 その他

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、必要に応じて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。

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。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.ac.jp/>)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 $0.13''/\text{pixel}$ 、 $0.0166 \text{ arcsec}^2/\text{pixel}$)で割れば、輝度に直せる。

違うフィルター画像の位置合わせ

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、他にうつつ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っていないと行けない。(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。

5.2 分光 (NL) の解析

図 5.2 は、分光解析の流れを、低分散分光、点源を例に示したものである。他の分光モードでも、基本的な流れは同じである。

5.2.1 ダークの準備

分光モードでは本当の観測に加えドームフラットの画像も解析に用いる。そのためダークは観測で用いたクロックと、Flat 画像と同じクロックのものを用意しなければならない。方法は撮像と同じである。詳しくは 5.1.1 参照。ここではフラット画像用のダーク画像ファイルを COMA00051862.fits (Nexp=98)、天体撮像画像用のダーク画像ファイルを COMA00051872.fits (Nexp=32) とすると、

```
q_list_stat ../DATA/COMA00051862.fits 1 - - : m51862
q_arith m51862 / 98 spcdark50_1          (フラット画像用ダーク画像)
q_list_stat ../DATA/COMA00051872.fits 1 - - : m51872
q_arith m51872 / 32 spcdark150_1        (天体撮像画像用ダーク画像)
```

使用するダークは同じ検出器で得られたものを使うこと。通常、ダークは Flat 測定と同じ検出器で得られたものがあるので、それを使えば問題ない。もしこのような同じ検出器で得られたダークが無く、全検出器で得られたダークしかない場合には、検出器軸 (w) 検出器ごとに解析を行うしかない。

各ファイルがどの検出器のデータを含んでいるのかはヘッダー内の Q_DETST を参照のこと。このキーワードは 0 か 1 の数字の羅列になっており、最初から撮像検出器、分光検出器 1,2,3,4,5 のステータスを表している。例えば 100110 の場合には、撮像データと、分光検出器 3,4 のデータが取られたことを示している。また、この分光検出器番号と FITS の 4 軸め (w 軸) の番号を混乱しないように注意。上の 100110 の場合には w=1 が分光検出器 3, w=2 が分光検出器 4 のデータになっている。

5.2.2 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ある。グレーティングがほんの少しずれた場合でもフラットは変化してしまうので、セッティングが観測時と同じでできるだけ時間が近いフラットを用いるべきである。

まず、ドームフラットの COMA 画像 (COMA00051356.fits とする) を平均し、ダークを引く。このフラットでは Nexp=9 なので、ダークを 9 倍してからひく。

```
q_list_stat ../DATA/COMA00051356.fits 1 - - : flat51356.fits
q_arith spcdark50_1 \* 9 spcdark50_9
q_arith flat51356.fits - spcdark50_9 flat51356_d.fits
```

このドームフラットも、撮像のフラット同様、視野全体のスケールで gradient がのることがわかっている。従って撮像同様、gaussian フィルターをかけた画像を作成し、これで割り算することで最終的なフラットをつくる。

```
cl> gauss flat51356_d.fits[, ,1,1] flat51356_dG.fits 20
```

最後の 20 はガウシアン幅を示す (20pix は過去の経験に基づく推奨値)。

```
q_arith flat51356_dG.fits / flat51356_dG.fits flat51356_dF.fits
```

これでフラット画像 (flat51356_dF.fits) ができた。

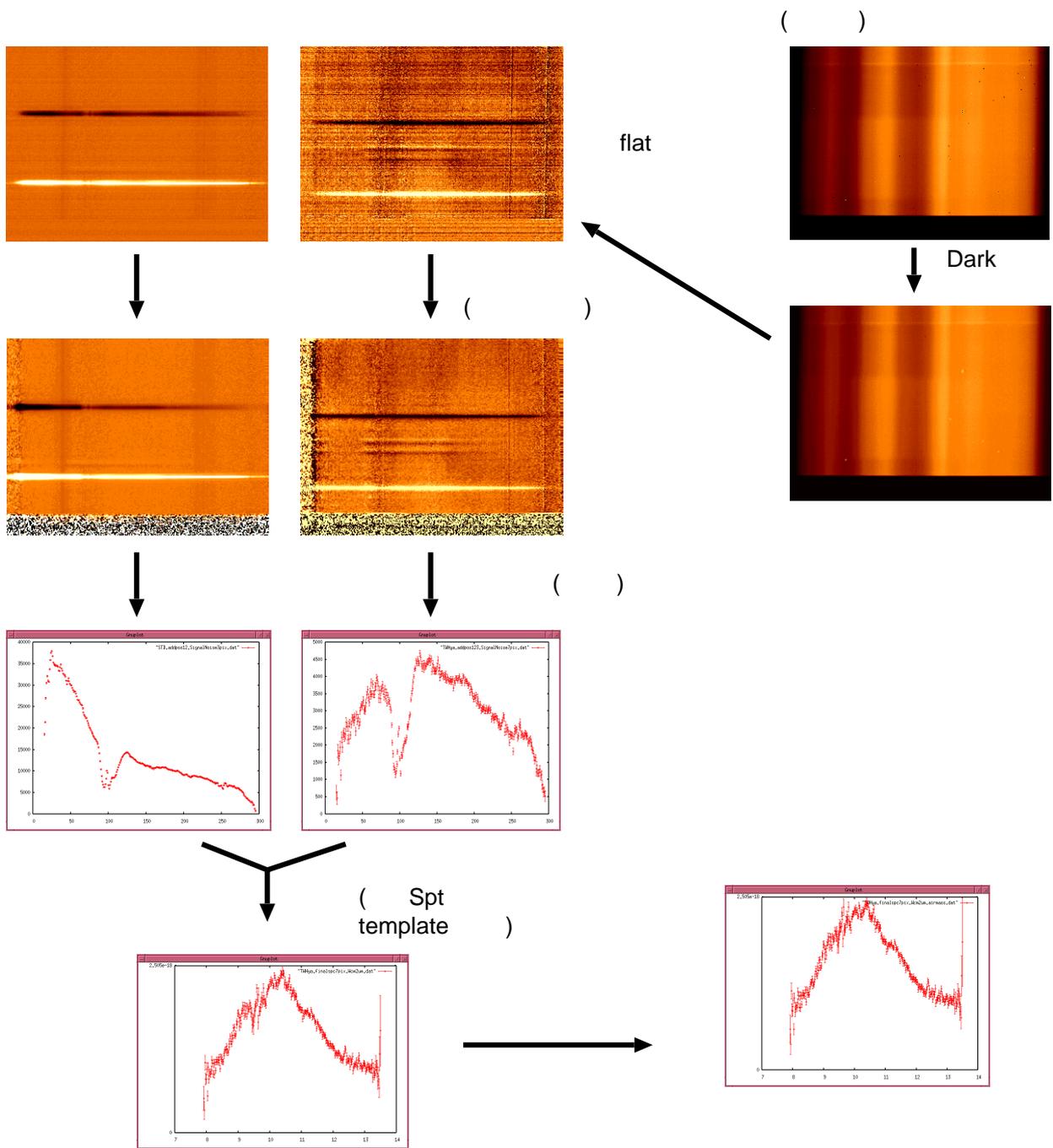


図 5.6: 分光解析の流れ (低分散分光点源の例)

5.2.3 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ため、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ため、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、`q_subch` というコマンドが使える。まずファイルから参照用の検出器画像を抽出する。例えば天体のスペクトル観測画像 `COMQ00051308.fits` (標準星観測画像) を解析する場合、

```
q_list_stat ../DATA/COMQ00051308.fits 2 - - 1 chnoize.fits
```

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、

```
q_subch chnoize.fits REF chnoize_REF.fits
```

このノイズパターン画像 (`chnoize_REF.fits`) を分光画像からひくことで、パターンノイズが除去され S/N が改善。

```
q_list_stat ../DATA/COMQ00051308.fits 1 - - 1 obj51308.fits
q_arith obj51308.fits - chnoize_REF.fits obj51308s.fits
```

ノイズは場合によるが、3-4 割も減少する。

5.2.4 各画像ファイルの処理

ここまででチャンネルに跨るノイズの処理が終わり、フラットの準備ができた。次は各データに対して画像処理を行う。

画像の足しあわせ

もしも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先に足し合わせると作業が楽になる。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。例として `COMQ00051314.fits`、`COMQ00051316.fits` という二つのファイルが同ポジションのスペクトル観測画像であったとし、それぞれのファイルに対し、前小節のパターンノイズの除去を行ったファイルを `obj51314s.fits`、`obj51316s.fits` とすれば、

```
q_fcombine obj51314s.fits obj51316s.fits ave=objspc.fits
```

フラットで割る

加算した画像 (先ほどの `objspc.fits`) やノイズ除去後の単体画像 (前小節の `obj51308s.fits`) を、あらかじめ作成しておいたドームフラット `flat51356_dF.fits` で割る。後者の単体画像の処理を例にとると、

```
q_arith obj51308s.fits / flat51356_dF.fits obj51308s_f.fits
```

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わったら、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 2.4 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、 $\lambda[\mu\text{m}] = Ax[\text{pix}] + B$ で表わされるが、図 2.4 のように y によって A, B が異なるため、さらに、 $A = a_0y + a_1, B = a_2y + a_3$ 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）。標準星のスペクトル撮像画像 COMA00051308.fits からスカイ画像を作る事を考えると、

```
q_list_stat ../DATA/COMA00051308.fits - - - : skyimage.fits
q_arith spcdark150_1 \* 3 spcdark150_3 (Nexp にあわせたダーク画像の作成)
q_arith skyimage.fits - spcdark150_3 skyimage_d.fits (ダーク減算)
q_list_stat skyimage_d.fits 1 - - - skyimage_d1.fits
q_arith skyimage_d1.fits / flat51356_dF.fits skyimage_d1f.fits (フラット補正)
```

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。

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 skyimage_d1f.fits 1 - default 1 2 > skyimage_d1f.res
```

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、 $\lambda[\mu\text{m}] = Ax[\text{pix}] + B$ 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 skyimage_d1f.res に入るので、GNU PLOT 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れ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、 $A = a_0y + a_1, B = a_2y + a_3$ という結果を得る (図 5.7)。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。

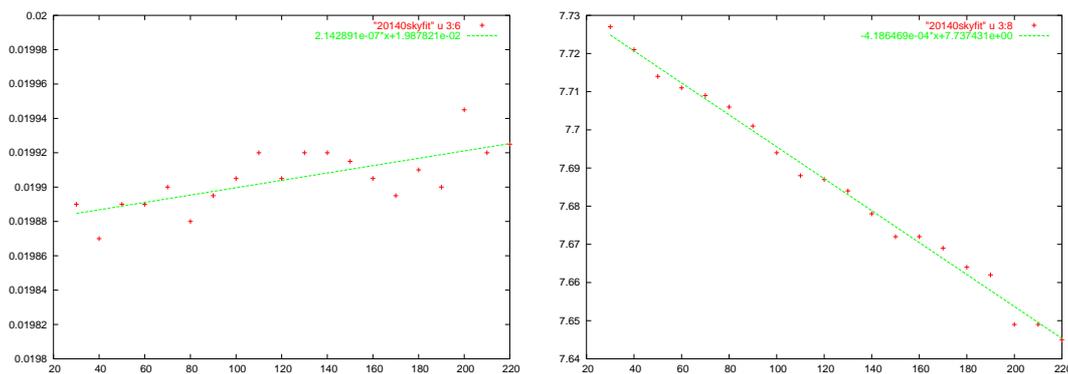


図 5.7: 波長ピクセル関係のフィット結果確認とフィットパラメータの 1 次関数フィット

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。これには明るい標準星のスペクトル観測画像を使用するのが良いので、標準星の撮像画像 COMQ00051308.fits を元にパターンノイズの低減・フラット補正を施して先に作った画像 obj51308s_f.fits から作る事を考える。

この操作にはコマンド `q_startrace` を使う。星の入っている y の範囲が $y=62-92$ だとすると以下のように操作を行う。なお、`q_startrace` の処理に時間がかかりすぎる場合には FAQ を参照されたい。

```
q_startrace obj51308s_f.fits 1 30-290 62:92 1 > obj51308s_f.str
```

`obj51308s_f.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 GNU PLOT 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 (図 5.8 の赤い点に相当)。オゾンなど大気の影響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 5.8)。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。

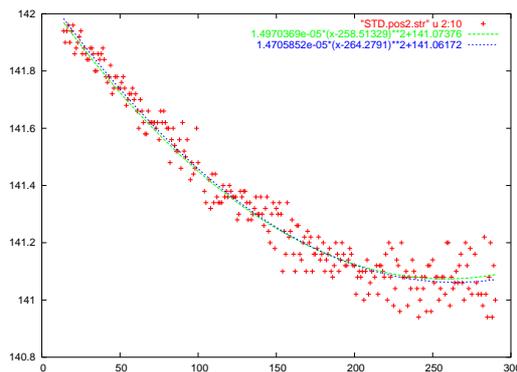


図 5.8: 空間一定線とそのフィッティング結果の例

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 trans.dat aa bb
```

ここで $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1$ はここまでの作業で求めた値に対応する。`trans.dat` は出力データに指定したファイル名で自由に名付けてよい。そして aa, bb は変換後の波長ピクセル関係 ($\lambda[\mu\text{m}] = aa \times x[\text{pix}] + bb$) を与えるパラメータ。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-07
```

```
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。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 (epar コマンドを使用)。

```
                I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = immatch
        TASK = geomap

input   =                The input coordinate files
database=          transpar 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
(funcutio=         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 transpar 1 320 1 240
```

これで画像変換のパラメータが `transpar` にかきこまれたので、`geotram` で画像変換する。画像変換に必要なファイルは、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パッドピクセルの影響が広がるので、パ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。実際のコマンドは、

```
im> geotran obj51308s_f.fits[1:320,1:240,1,1] obj51308s_ft.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. 画像変換の確認と波長校正式の確定

画像変換が終了したら、空間一定軸が水平に、波長一定軸が垂直に正しく変換されているかを `q_startrace`, `q_sky_nlow` コマンドを用いて確認する。`geotran` コマンドで出力されたファイルは3次元データだが、`q_startrace`, `q_sky_nlow` コマンドは4次元データしか受け付けないため次元の変更をする必要がある。

まず空間一定軸の変換確認を考える。これには標準星のスペクトル観測データの変換画像 (obj51308s_ft.fits) に対して q_startrace をかけ、その結果を GNU PLOT 等を用いて図 5.8 のようなプロットを作り、シグナルのピーク位置が x 軸の値によらず一定となっているかを確認すればよい。q_startrace コマンドにかけるため、最初に obj51308s_ft.fits を 4 次元データに変換し、q_startrace にかけるには以下のコマンドを実行すればよい。

```
q_chgaxis 4 obj51308s_ft.fits obj51308s_ft4.fits
q_startrace obj51308s_ft4.fits 1 30-290 62:92 1 > obj51308s_ft4.res
(obj51308s_ft4.res のプロットを確認)
```

次に、波長一定軸の変換確認を考える。これはスカイ画像 (先の skyimage_d1f.fits) に画像変換を施してその結果に q_sky_nlow を施し、結果をプロットして A,B の値が y 軸によらず一定となっているかを確認すればよい。

```
im> geotran skyimage_d1f.fits[1:320,1:240,1,1] skyimage_d1ft.fits transpar trans.dat
q_chgaxis 4 skyimage_d1ft.fits skyimage_d1ft4.fits
q_sky_nlow skyimage_d1ft4.fits 1 - default 1 2 > skyimage_d1ft4.res
(skyimage_d1ft4.res のプロットを確認)
```

q_transtable2 コマンドの引数 *aa*, *bb* で大まかに与えた波長更正式のパラメータを skyimage_d1ft4.res の結果から確定させ、波長校正式を確定する。

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、スカイの引き残しを補正する。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。この操作をするコマンドが q_submedrow で、以下のように用いる。

```
q_submedrow obj51308s_ft.fits 1 320 150 240 obj51308s_ftc.fits
```

スカイの引き残しを補正した obj51308s_ftc.fits というファイルができた。

5.2.5 スペクトルの切りだし

得られた 2 次元データ (obj51308s_ftc.fits) からスペクトルを切り出す。

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。

例えば y=72 の位置に天体が写っているデータがあったとする。y=110-130 を天体その他のシグナルが無いブラunk領域だとすると、ここからノイズを見積もれる。

```
q_list_stat obj51308s_ftc.fits 1 15-295 110:130 1 >! obj51308s_ftc.noise1pix
```

obj51308s_ftc.noise1pix の column-6 が各 X (波長に対応) での 1pix あたりのノイズである。

次に天体のスペクトルを切り出す。切り出す幅を 3pix だとすると、y = 71-73 を切り出せばよい。

```
q_list_stat obj51308s_ftc.fits 1 15-295 71:73 1 >! obj51308s_ftc.signal1pix
```

obj51308s_ftc.signal1pix の colum-5 が各 X (波長に対応) あたりのカウントとなる。ただしこの処理では pixel で平均化されているので注意。加算したカウントをもとめるにはこれを 3 倍しなければならない。同様に、ノイズの方も 3pix の加算量で求めるには $\sqrt{3}$ 倍が必要になる。

```
awk '{print $2,$5*3}' obj51308s_ftc.signal1pix >! obj51308s_ftc.signalAdd
awk '{print $2,$6*sqrt(3)}' obj51308s_ftc.noise1pix >! obj51308s_ftc.noiseAdd
```

これを paste などでも1つのファイルにしておくのも便利かもしれない。

```
paste obj51308s_ftc.signalAdd obj51308s_ftc.noiseAdd | awk '{print $1,$2,$4}' >! obj51308s_ftc.SN
```

これで、ファイル objspc.Ftc.SN に $x[\text{pix}]$ 、シグナル [ADU]、ノイズ [ADU] が格納された。

5.2.6 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 $1\text{pix}=0.13''/\text{pix}$ なのに対し、分光側では $1\text{pix}=0.165''/\text{pix}$ であることに注意し、シフト量を定める。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 (5.1.5)。

5.2.7 波長の当てはめ

上までに得られた結果は pixel とカウントおよびノイズのデータである。この pixel を波長に直す作業が必要となる。

sky を画像変換したデータから波長とピクセルの関係式は分かっているので (skyimage.d1ft.res に書かれている)、その関係式を使う。 $a = 1.9900 \times 10^{-2}$, $b = 7.5774$ だとすると、

$$\lambda[\mu\text{m}] = 1.9900 \times 10^{-2} \times x + 7.5774$$

を用いて波長を求めれば良い。例えば awk を使う場合は、

```
cat obj51308s_ftc.SN | awk '{print 1.9900e-2*$1+7.5774,$2,$3}' > obj51308s_ftc.SN.um
```

となる。

5.2.8 大気吸収・効率の補正

標準星の割算

図 5.9 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 ）の影響を受けている。理想的に T_λ が天体と標準星で同じとすると、

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

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

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

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 5.9 の (C) \div (A) \times (B)）。

標準星の真のスペクトル (F_{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。

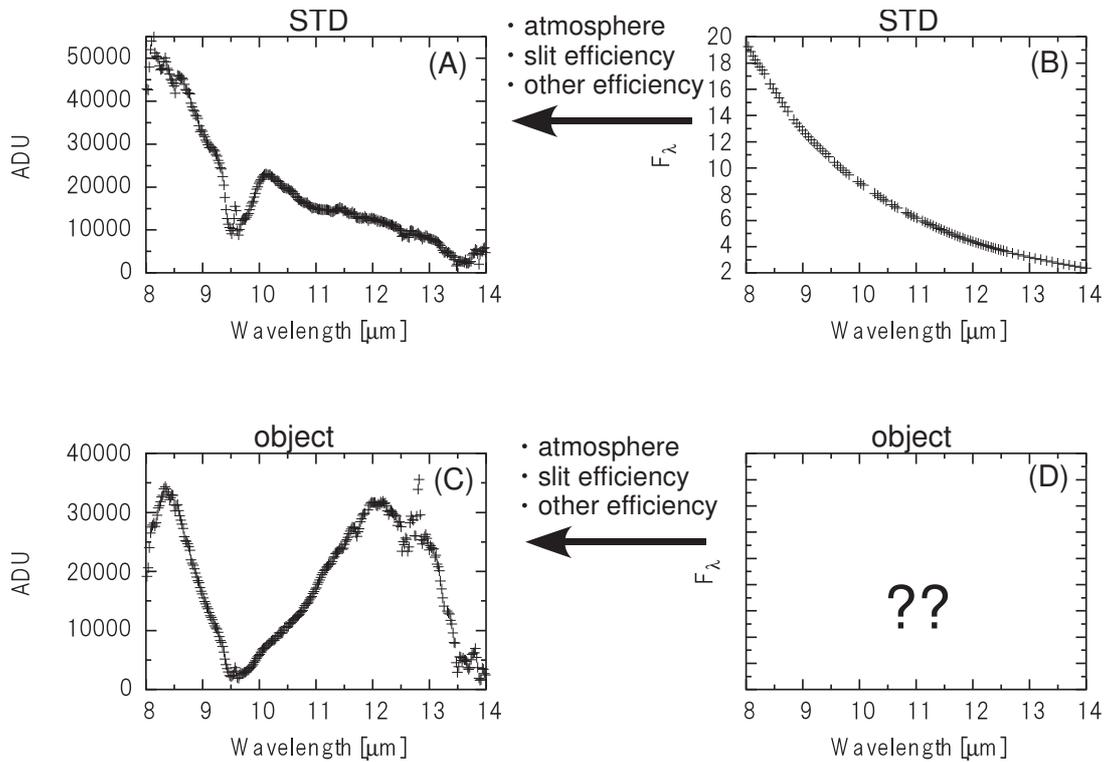


図 5.9: 標準星からスペクトルを得る原理。(A) ÷ (B) は、装置の特性を含む大気のスเปクトル。標準星と天体がまったく同じスリット効率で観測されていれば、(D)=(C) ÷ [(A) ÷ (B)] で求められるが、実際にはスリット効率が異なるため、スケールが必要(本文参照)。

スリット効率の補正

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、観測条件により、星像がダブっ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、どうしても補正が必要となる。

スリット効率の補正には多色の撮像データが必要になる。例えば2色のデータがある場合、これまでの解析で得られた観測スペクトルが $F_{\text{obsobj}}(\lambda)$ とすると、これに効率 $\epsilon(\lambda) = a \times \lambda + b$ をかけた結果

$$F'_{\text{obsobj}}(\lambda) = 1/\epsilon(\lambda) \times F_{\text{obsobj}}(\lambda)$$

が撮像での測光結果とあうように a, b を求めれば良い。

ほとんどの場合、スリット効率は1次で充分補正できる。

5.2.9 Diffuse 天体の場合

Diffuse 天体の場合でも上と同様に解析を行い、スペクトルの1次元化を様々な場所で行えば問題はない。しかしながら大きく広がったデータなどの場合には、各々の場所で切り出しをして補正をするのは面倒であり、2次元データのまま補正をしてしまう方が良い場合もある。

これを行うにはまず補正する関数を先に計算する。標準星の解析結果 (F_{obsstd}), 標準星の真のスペクトル (F_{truedstd}) およびスリット効率 $\epsilon(\lambda)$ を用いるとこれは

$$\frac{F_{\text{truedstd}}}{F_{\text{obsstd}} \times \epsilon(\lambda)}$$

と記述される。

この関数は波長に対する関数なので、これを pixel にあてはめる。当てはめは波長校正の式を逆に用いれば良い。これで pixel と上補正值の関数を得ればこれを 2 次元化し、観測天体の解析済み 2 次元データ (objspc_Ftc.fits) に (画像として) かけ算すれば 2 次元のデータが得られる。補正関数の 2 次元化は q_mking を使えば可能である。

例えば補正関数がファイル (calib.dat) に入っているとす。この calib.dat は各行に補正関数の値だけがかけられており、1 行めに X=1, 2 行めに X=2,... となっているとする。この場合は

```
echo 1 | awk '{for(i=0;i<240;i++){print"cat calib.dat"}}' | sh > tmp
q_mking tmp calib.fits 320 240
q_arith objspc_Ftc.fits \* calib.fits objspc_Ftc_calib.fits
```

などとすれば補正が完了する。

5.3 考えられる質問など

5.3.1 ozone at 9.6 μm の評価

やってみるとよくわかりますが、9.3–10.0 μm のあたりは、地球高層大気のお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・天体のエアマスが良くあわせていけば、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 9.3–10.0 μm 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、 $\sim 9.6\mu\text{m}$ 近辺が系統的にどのように出っばる / 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、ATLAN 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 10 μm 分光観測の鬼門といえるでしょう。

5.3.2 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 N11.7 での残存パターンは 35mJy/arcsec² と測定されているので、天体の明るさがこれ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。

5.3.3 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ーワ（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ください。

5.3.4 geotran で変換しようとするとう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だと、[1:320,1:240,1,1] と明示的に示せば認識されます。

5.3.5 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。

5.3.6 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。