

平成 24 年度学士論文

可視光領域低分散分光器における
C/2009 P1(Garradd)彗星の分光観測

教員養成課程 理科教育専攻 地学・天文学ゼミ

8508 奥 貴憲

目次

I. 序論	P. 1~10
II. 觀測	P.11~25
2.1 觀測裝置	P.12~15
2.2 觀測方法	P.16~25
III. 解析	P.26~61
3.1 一次處理	P.27~36
3.2 解析	P.37~60
3.3 解析結果	P.61
IV. 考察	P.62~69
V. 參考文獻	P.70
VI. 謝辭	P.71

I .序論

1.1 本研究の目的

今まで天文ゼミでは小惑星と彗星の測光観測や流星の撮像観測が行われてきた。そして、今年度から新たに可視光領域低分散分光器による分光観測を行うこととなった。

本研究の目的は彗星を分光観測し、彗星コマの成分と分子種の生成量を調べることである。

1.2 スペクトル

まず、分光器と分光観測について述べる前にスペクトルについて説明する。光を分光するとスペクトルが得られる。スペクトルとは天体の光を波長ごとの強度分布に示したものである。

太陽などの恒星からの光は様々な波長の光（電磁波）を含んでいて、分光すると長波長から短波長までの光が連続的に分布する。このようなスペクトルを連続スペクトルという。横軸を波長、縦軸を放射強度のグラフで表すと、連続スペクトルは図 1.1 のような分布になる。温度が高い恒星ほど最大放射強度が短波長側に、低いほど長波長側に分布する。

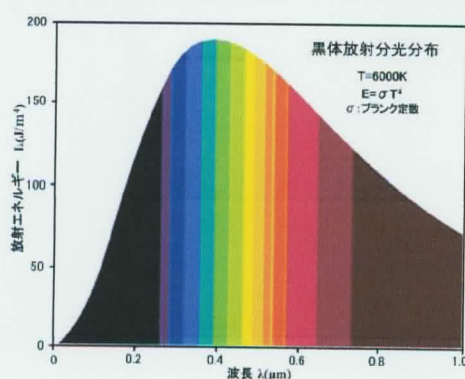


図 1.1：連続スペクトルの概念図

恒星のスペクトルは山のようなスペクトルで、
スペクトルの一番高いところが最大放射強度。

実際、恒星を分光観測しても図 1.1 のように綺麗な連続スペクトルは得られない。図 1.2a と図 1.2b はアルビレオの分光した様子とスペクトルを示した。アルビレオのスペクトルに放射強度が小さい波長がいくつかあり、滑らかな曲線となっていない。これは恒星の光が地球大気と恒星自体のガス成分により吸収され減光したためである。特に後者の影響で現れたスペクトルを暗線（フラウンホーファー線）といい、線スペクトルに分類される。

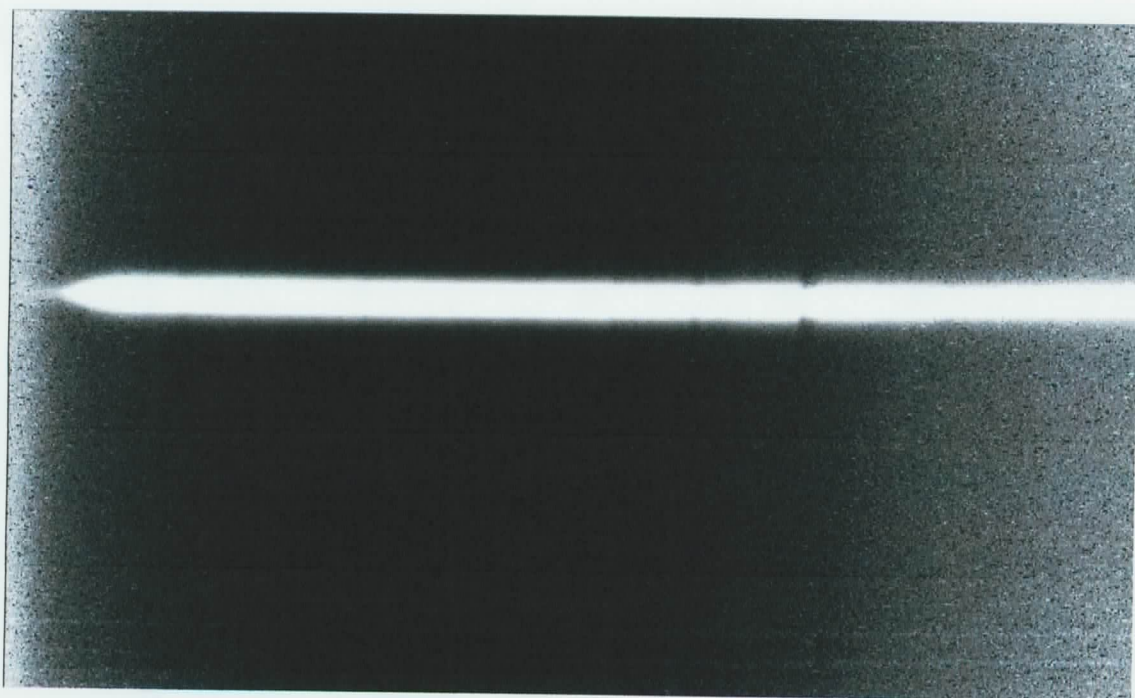


図 1.2a: アルビテオの分光画像

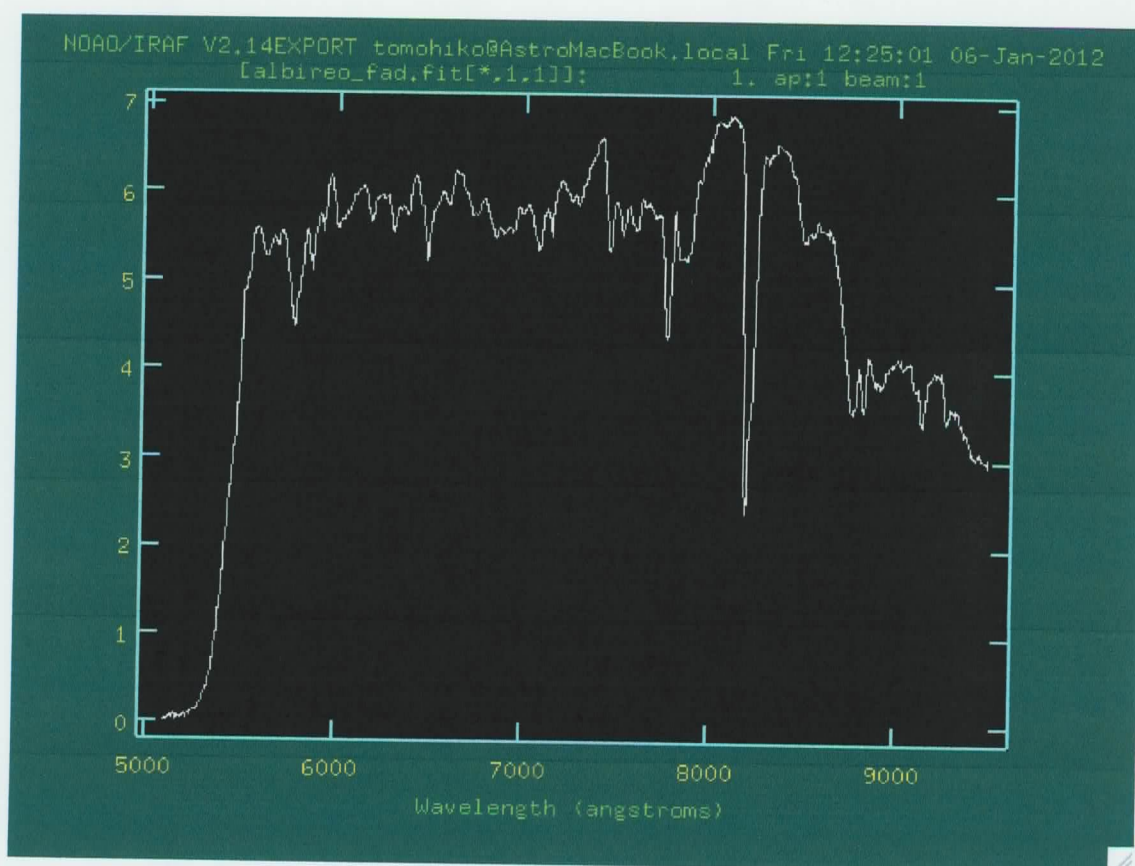


図 1.2b : アルビレオのスペクトル

線スペクトルにはもう1つ、輝線スペクトルがある。輝線スペクトルは原子の電子励起、分子の振動遷移、回転遷移により紫外線領域から電波領域まで様々な波長に部分的に現れる。

ここで、電子励起により現れる輝線スペクトルについて説明する。原子は原子核の周りに電子が回っている構造をしている。その電子はとびとびに分布した、ある定まった軌道上のみを回ることができる。また、それぞれの軌道ごとに電子が持てるエネルギーは決まっている。このため、電子はとびとびのエネルギー値しかもてない。この電子がもつことのできるエネルギーの値のことをエネルギー準位という。

エネルギー準位は原子の種類ごとに決まっている。また、原子核に近い軌道上にある電子ほど、原子核に強く束縛されるので低いエネルギーを持つといえる。原子は安定な状態を取ろうとする。安定な状態とは電子の持つエネルギーの総和が最小の状態のことである。具体的にいうと、原子核に近い軌道ほど電子の持てるエネルギーが低く、1つの軌道上には2つまで電子が存在できるという性質があるので、エネルギーの総和が最小になるということは原子核に近い軌道から順番に電子が2個ずつ入った状態のことである。この安定な状態を基底状態という。

なぜ原子が発光するのかというと、基底状態にある原子が光を受けると、そのエネルギーを吸収し、より大きなエネルギーをもった状態になる。このように、原子を基底状態に比べて高いエネルギーの状態にすることを励起という。励起状態になることはエネルギー準位の低い内側の軌道を回っていた電子をエネルギー準位のより高い外側の軌道に持ち上げることを意味している。吸収する光のエネルギーだが、これは吸収する前後のエネルギー準位の差に等しい。エネルギー準位はとびとびの値しかもたないので特定のエネルギーをもった光のみが吸収される。また、光のエネルギーは波長によって定まっている。このため、暗線も恒星の連続スペクトル上の決まった波長に何本か現れる。輝線スペクトルの場合は励起状態にある原子は不安定な状態なので安定な基底状態に戻ろうとする。このときに余分なエネルギーを光エネルギーとして放出する。エネルギー準位は原子ごとに決まっており、光エネルギーは波長によって定められていることから、ある波長に何本かのスペクトルが現れる。輝線スペクトルの例を図 1.3a b に示した。

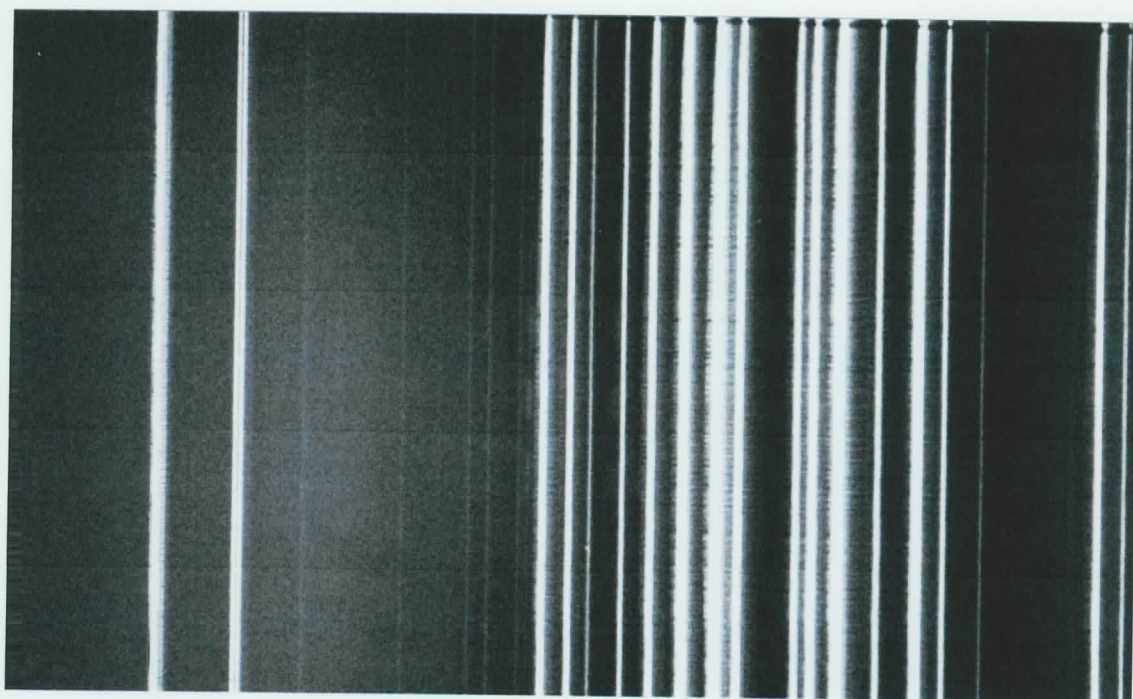


図 1.3 a: ネオンランプの分光画像

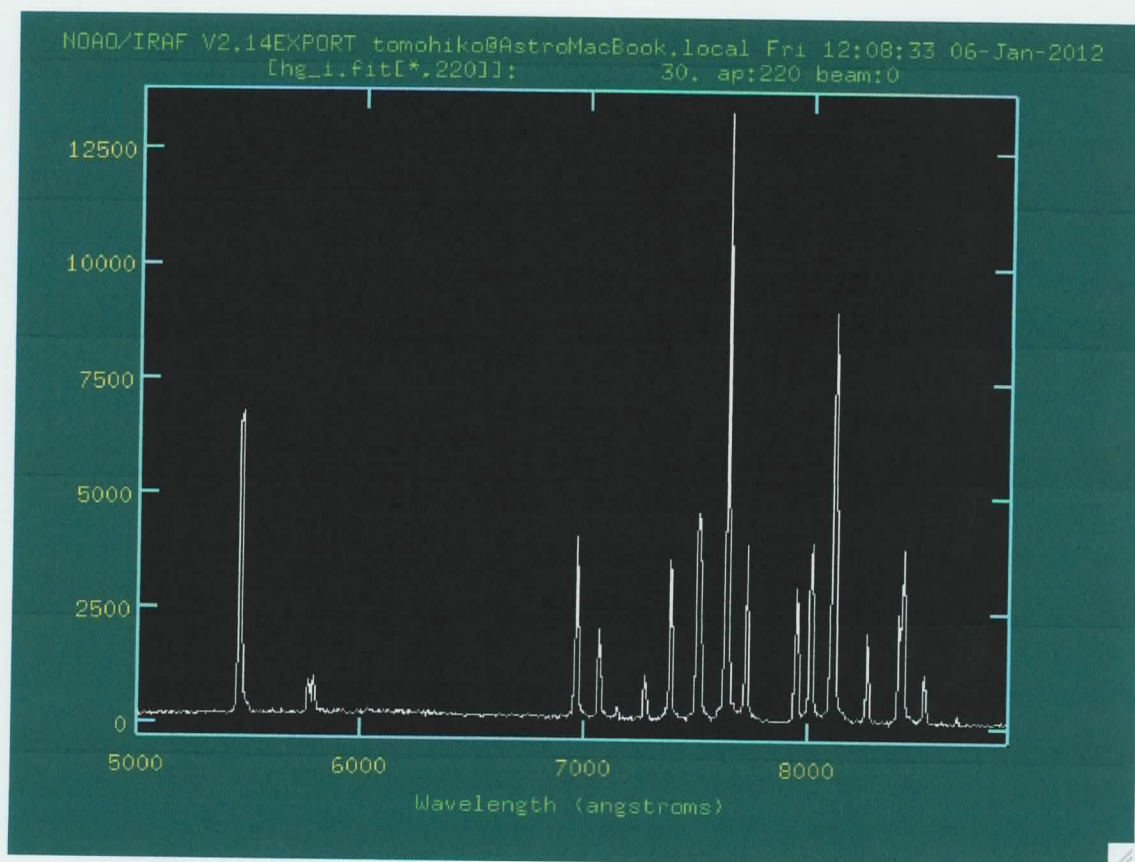


図 1.3 b: ネオンランプのスペクトル

スペクトルは天体を調べる上で重要な情報を与えてくれる。連続スペクトルを見れば温度がわかる。線スペクトルをみれば天体の成分とその量を知ることができる。分光観測は天体の情報を得る上で非常に強力な観測手法である。

1.3 分光器

1.2 に示したように分光観測は天体のスペクトルを得るための観測である。このスペクトルを得るための装置を分光器という。本研究で用いる分光器は特にスリット分光器という。

分光器の構造を簡単に図 1.4 に示した。回折格子型分光器は望遠鏡によって集光された光が細い切れ目の入った薄い板（スリット）にあたり、その隙間を通った光がコリメーターレンズにより平行光にされる。次に回折格子に当たると光は波長ごと曲がり方が違うので、波長ごとに光が分けられる、最後に分光された光が結像レンズによってそれぞれ集光され、CCD チップに像を結ぶといった構造になっている。また、スリットに目的天体が入っているか確かめるために、別途撮像するためのスリットビューワーも備え付けられている。

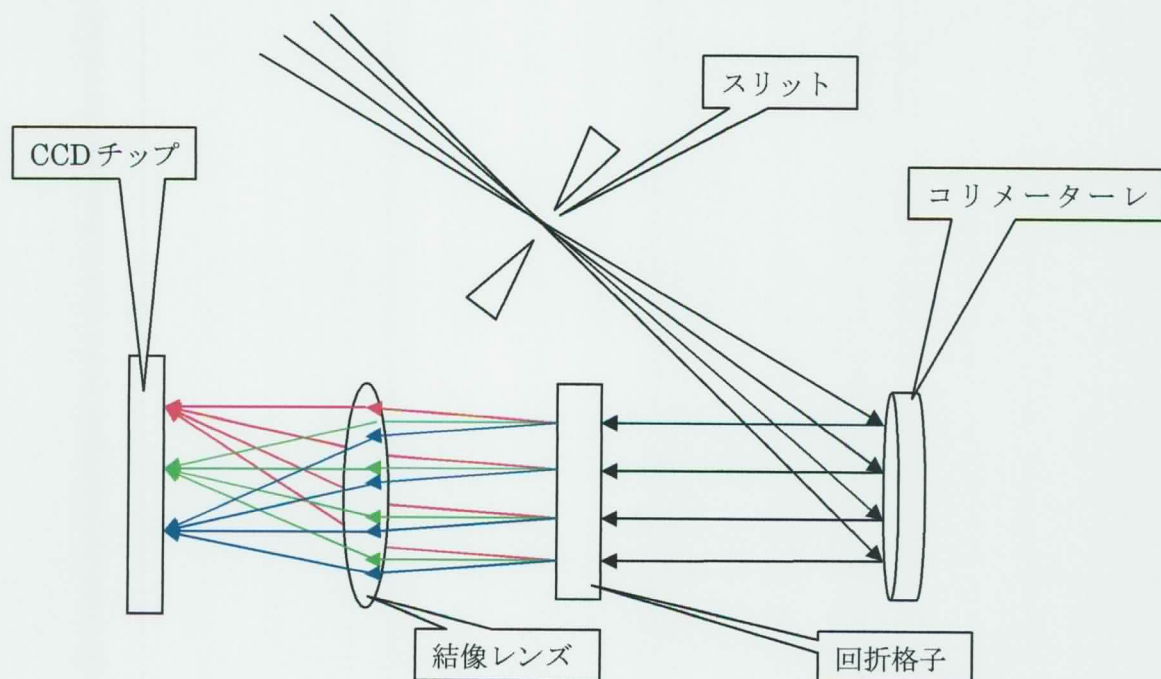


図 1.4:分光器の概念図

1.4 彗星

彗星は大きく分けて、核、コマ、尾の三つの部分からなる。彗星は汚れた雪玉とも言われ、 H_2O や有機物、ケイ酸塩鉱物の塵を含んだ核を持っている。彗星が太陽に近づくと彗星の表面が温められて、表面成分が昇華し始める。その際に現れるのがコマである。彗星核の活動が十分に活発になるとガスや塵が広範囲に放出され、それらが 2 種類の尾を形成する。彗星のスペクトルは太陽光を反射しているので太陽の連続スペクトルが現れる、そのスペクトルの上に、彗星のガス成分の輝線スペクトルがのっかっている形となる。つまり、彗星のスペクトルを見ることは、彗星の成分とその量を知る手がかりとなる。

1.5 ターゲットについて

本研究のターゲットは 2009 年 8 月 13 日に G.J.Garradd 氏によって発見された C2009/P1 Garradd 彗星である。発見当初は 17.5 等級の明るさで、本絵研究が観測した際には 6.9 等級程の明るさであった。図 1.5 は Garradd 彗星の画像で、イオンテイルとダストテイルが見え彗星が活発に活動していることが見てうかがえる。この天体の等級変化 (図 1.6) と軌道要素 (図 1.7a b c)、を以下に示す。



図 1.5: 2011 年 1 月 7 日 Rolando Ligustri 氏が撮像観測した Garradd 彗星
(引用: 吉田誠一のホームページ <http://www.aerith.net/index-j.html>)

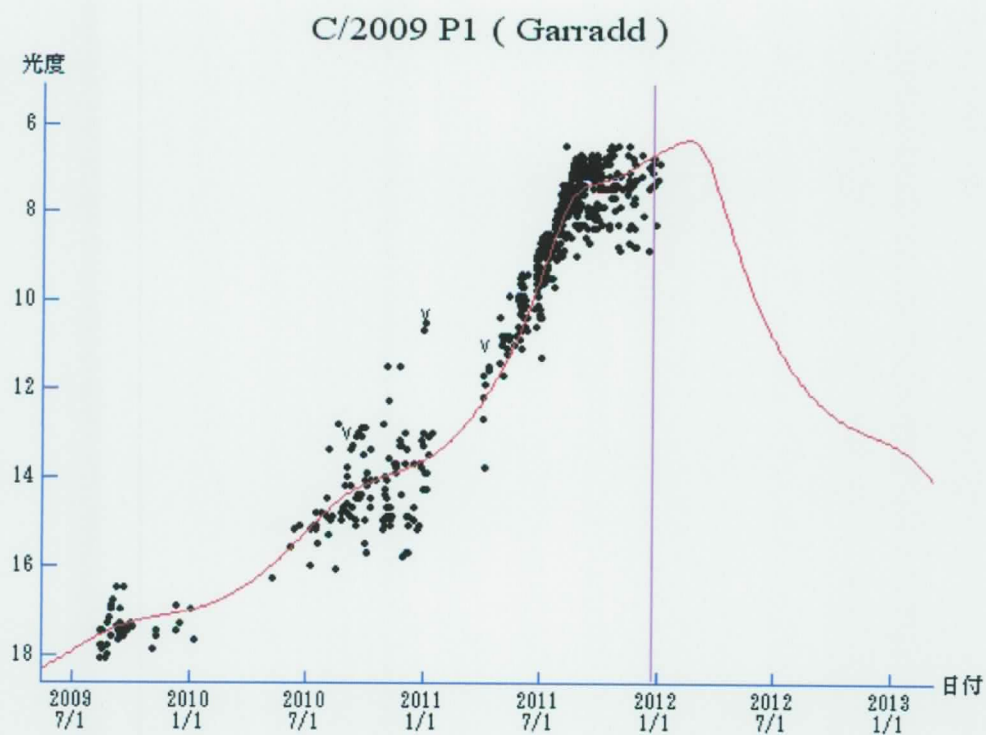


図 1.6 C2009P1 の光度変化

(引用 : 吉田誠一のホームページ <http://www.aerith.net/index-j.html>)

Element	Value	Uncertainty (1-sigma)	Units
e	1.000965379691469	7.6885e-06	
a	-1606.151709560451	12.79	AU
q	1.550546241827935	2.3723e-06	AU
i	106.1774660115252	1.3426e-05	deg
node	325.9979475849321	5.5691e-06	deg
peri	90.74540803104739	0.00039884	deg
M	.0002958954336087972	3.5391e-06	deg
t _p	2455919.175243268364 (2011-Dec-23.67524327)	0.00051976	JED
period	n/a	n/a	d
	n/a	n/a	yr
n	1.531172876936636E-5	1.829e-07	deg/d
Q	n/a	n/a	AU

図 1.7a : 2011 年 1 月 5 日 Garradd 彗星の軌道要素

(引用 : JPL's HORIZON System-JPL Solar System Dynamics-NASA
<http://ssd.jpl.nasa.gov/redirect/horizons.html>)

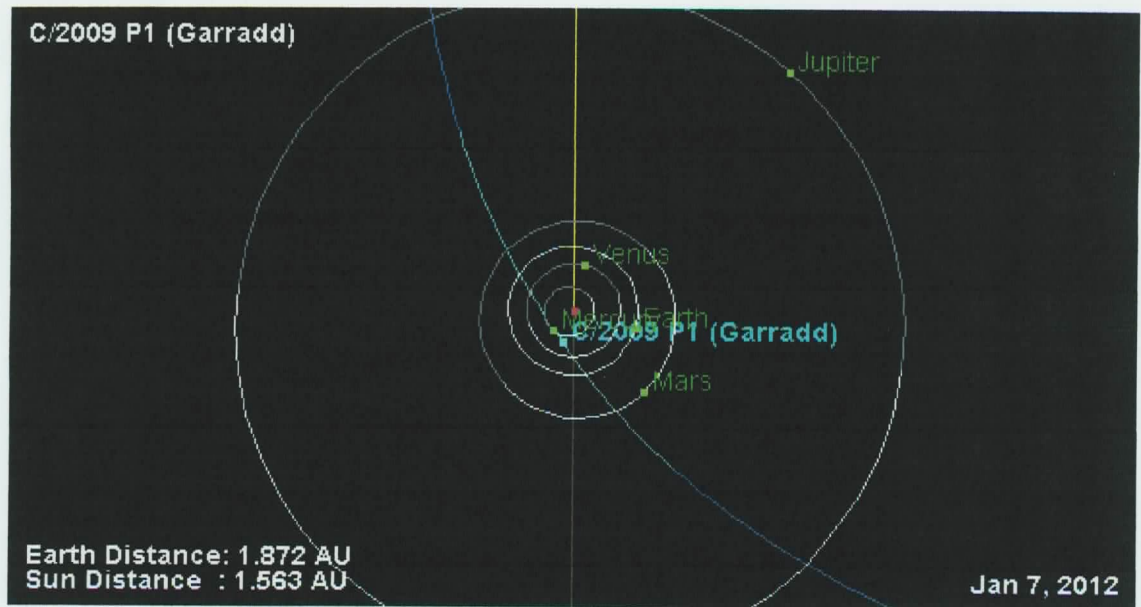


図 1.8b : 軌道を黄道面から見た様子

(引用 : JPL's HORIZON System-JPL Solar System Dynamics-NASA

<http://ssd.jpl.nasa.gov/redirect/horizons.html>)

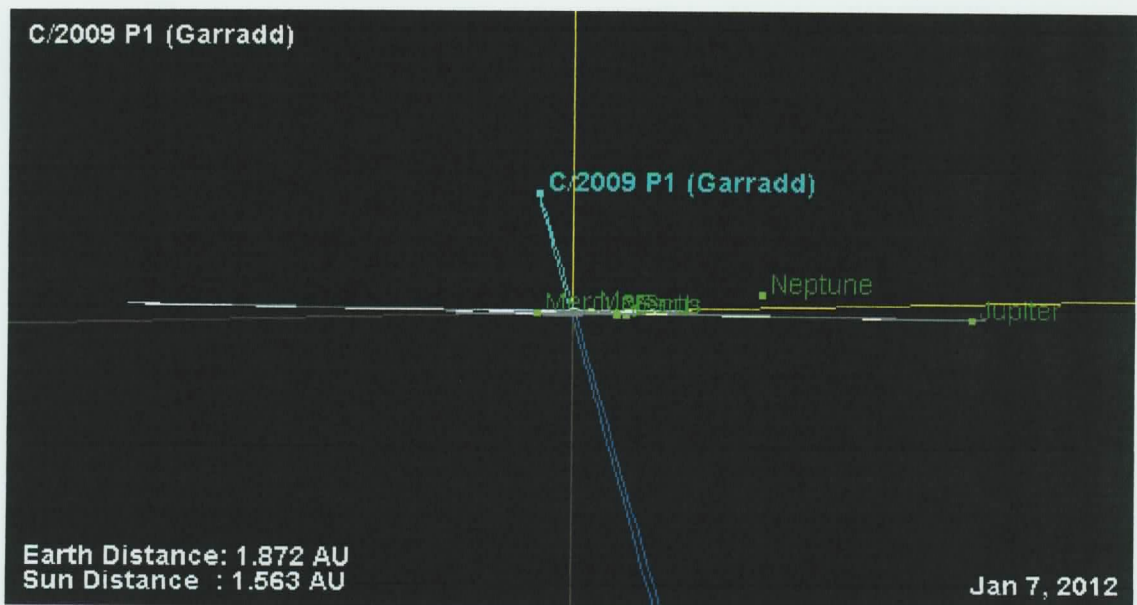


図 1.7c : 軌道を黄道面から水平に見た様子

(引用 : JPL's HORIZON System-JPL Solar System Dynamics-NASA

<http://ssd.jpl.nasa.gov/redirect/horizons.html>)

Ⅱ 観測

2.1 観測装置

1.1 観測場所

観測場所は名寄市なよろ市立天文台きたすばるを利用した。(図 2.1)



図 2.1:なよろ市立天文台きたすばる
(経度：東経 142 度 28 分、緯度：北緯 44 度 22 分、高度：151m)

1.1 ピリカ望遠鏡 (1.6m 望遠鏡)

研究に関する観測にあたってなよろ市立天文台きたすばるに北海道大学が設置したピリカ望遠鏡を使用した。(図 1.8)ピリカ望遠鏡は経緯台式反射望遠鏡で、仕様は以下に示す。

・ピリカ望遠鏡の仕様

全体光学系

焦点	: カセグレン系
有効口径	: Φ 1600mm
合成焦点距離	: 19238mm(F/12.6)
有効視野	: カセグレン系 Φ 20 分角

主鏡

材質	: 無膨張セラミックガラス Astro-sitall
サイズ	: 直径 1620mm、厚み 220mm
コーティング	: SiO 保護膜付きアルミニウム

副鏡

材質	: 無膨張セラミックガラス Astro-sitall
サイズ	: 直径 305.6mm、厚み 50mm

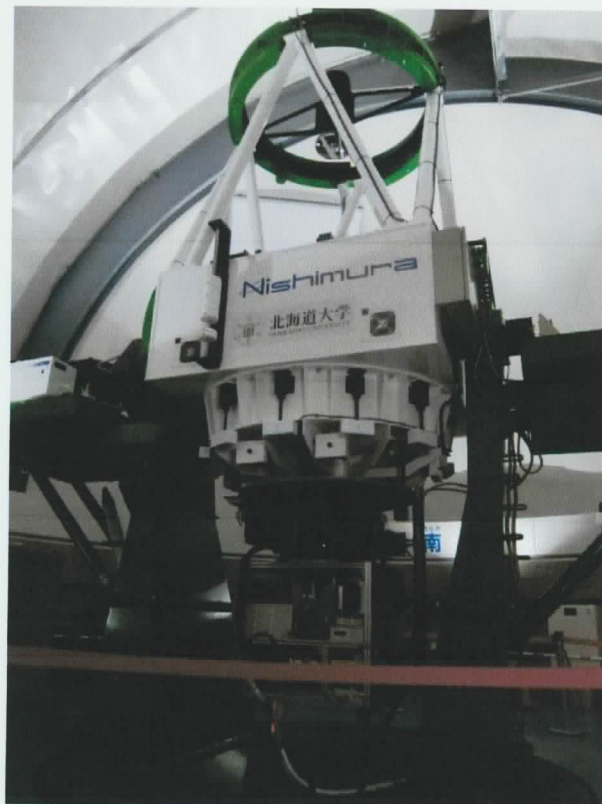


図 2.2 : 1.6m 望遠鏡(ピリカ望遠鏡)

1.2 分光器

研究では京都産業大学と共同研究によって新規に開発した分光器を使用した。分光器には SBIG 製の冷却 CCD ST-402ME と watec 製の wat-120N が取り付けられている。

・分光器



図 2.3 本研究で使した分光器の外観

・冷却 CCD

CCD カメラ : SBIG 社の ST-402ME
総ピクセル数 : 390,000(pixels)
ピクセル配列 : 765×510(pixels)、6.9×4.9(mm)
ピクセルサイズ : 9×9(μ m)
露出時間 : 0.04~3600(秒)
ビニングモード : 1×1、2×2、3×3、1×N、2×N、3×N、9×9
(N : 垂直方向のビニング数)



図 2.4: 分光器に取り付けてある冷却 CCD

- ・スリットビューワーに取り付けた CCD カメラ

CCD カメラ : Watec 社の wat-120N

有効画素数 : 38 万画素

ピクセル配列 : 811×508

ピクセルサイズ : 8.4×9.8 ミクロン

シャッター速度 : HI : OFF, 1/25, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000(秒)

LO : 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256(秒)



図 2.5: スリットビューワー用の CCD カメラ

1.3 その他必要な機器

- ・ CCDOPS

分光器に取り付けてある冷却 CCD を操作するためのソフトウェア

- ・ デバイスサーバー LDV-2 UH

CCD カメラを遠隔操作するための装置。

- ・ TIGHT-VNC

スリットビューワー用の PC を遠隔操作するためのソフトウェア

- ・ UFO キャプチャー

スリットビューワーがとらえた天体の光をモニター画面に映し出すためのソフトウェア

2.2 観測方法

2.1 事前準備

本研究で使用する分光器は北海道教育大学の天文台にある望遠鏡に取り付けることを考えて設計されている。このことから、ピリカ望遠鏡に分光器を取り付けるために様々な周辺機器の整備を行なった。(図 2.6、図 2.7、図 2.8)

図 2.6 : 同軸ケーブルはんだ作業

2.2 観測計画

観測にあたってターゲットと標準星の細かな位置情報を取得し、スケジュールを立てると効率よく観測することができる。ターゲットと標準星の位置情報の取得方法について以下に示す。

①ターゲットの位置情報の取得

ターゲットの情報は NASA の Jet Propulsion Laboratory の JPL Solar System Dynamics (<http://www.ssd.jpl.nasa.gov/>) というページからターゲットの必要な情報を得ることができる。以下のように取得する。

まず、「HORIZON」をクリックする。

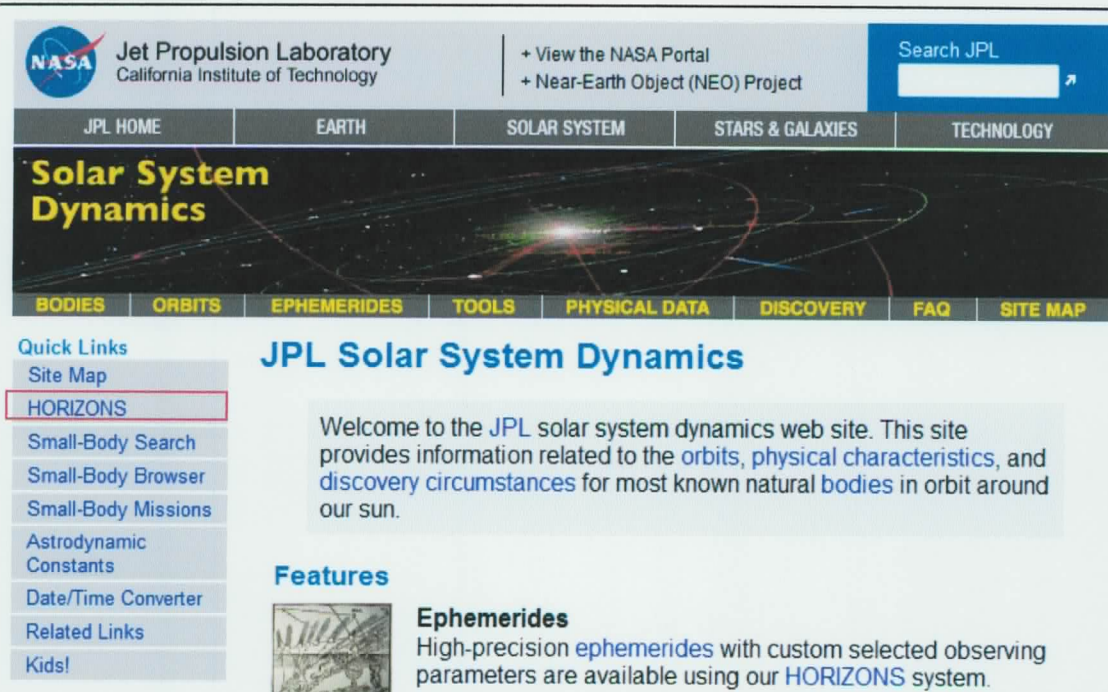


図 2.1 JPL HORIZON

すると、図 2.2 のページへ移動する。

次に「Web interface」をクリックする。

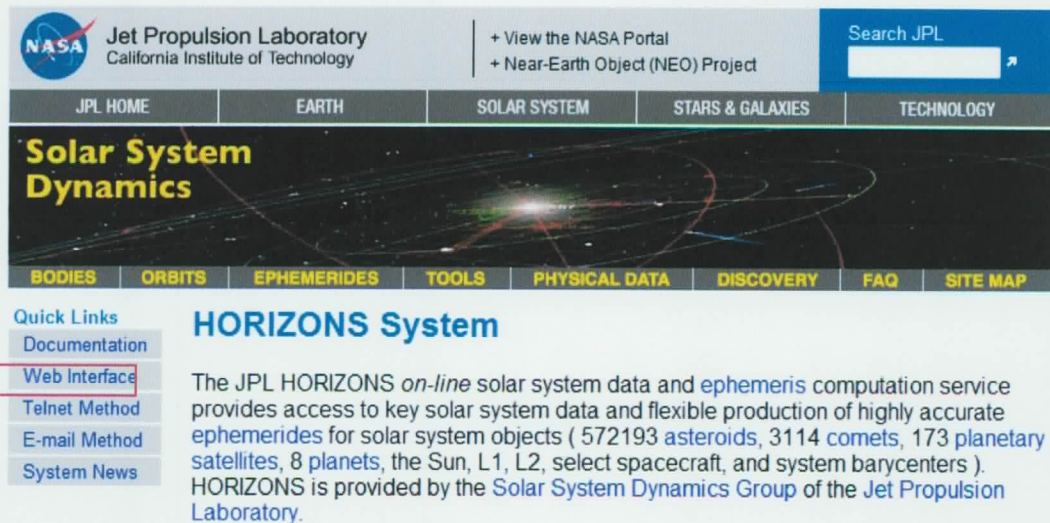


図 2.2

すると、図 2.3 のページに移動する。このページの Current Settings の下にある項目を設定することでターゲットの情報を取得することができる。

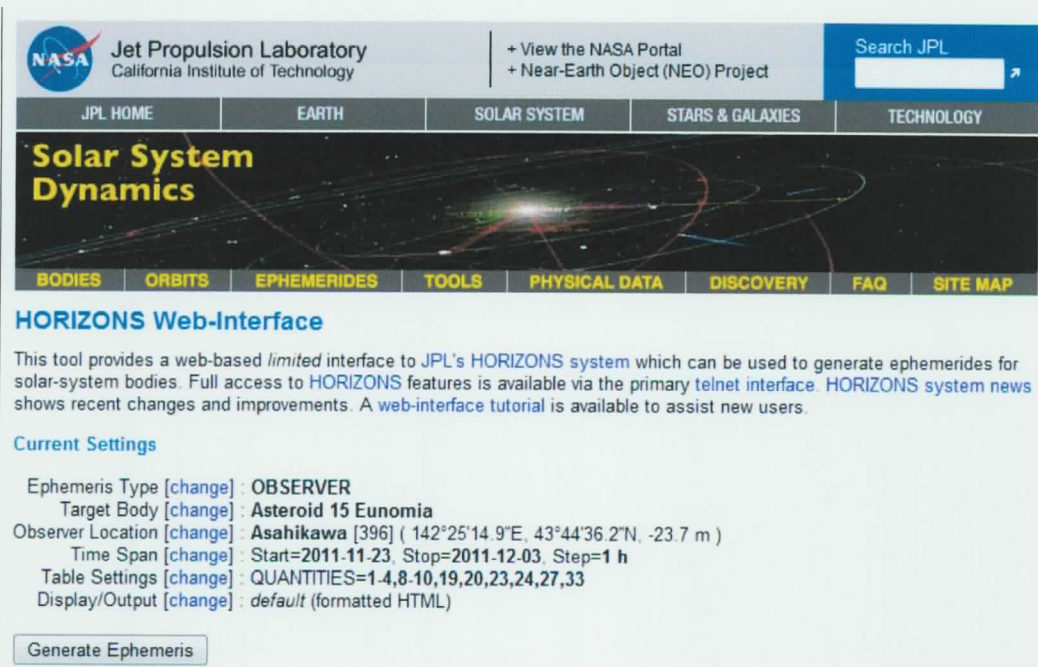


図 2.3

設定が必要な項目と設定方法を以下に示す

- (1)Target body:ターゲットの名称を入力する。
- (2)Observer Location:観測地点の経度と緯度を入力する。
- (3)Time span:世界時(日本標準時の-9時間)であることに注意して、Start Time に観測開始の、

Stop Time に観測終了の年月日を入力する。また、Step Size にどれくらいの時間間隔で位置情報が欲しいか指定する。

(4)Table Setting:特に設定する必要はないが、位置情報の他に取得したい情報を選択することができる。クリックすると図 2.4 のページへ進む。

Table Settings

Select observer quantities from table below:
[switch to manual-entry list-of-numbers form]

Use Settings Below Cancel

Optionally preset observer quantities selection using one of the following:

planets satellites small-bodies default all none

1. ☒ Astrometric RA & DEC	15. ☐ Sun sub-long & sub-lat	29. ☐ Constellation ID
* 2. ☐ Apparent RA & DEC	16. ☐ Sub Sun Pos. Ang & Dis	30. ☐ Delta-T (CT - UT)
3. ☒ Rates; RA & DEC	17. ☐ N. Pole Pos. Ang & Dis	* 31. ☐ Obs eclips. lon & lat
* 4. ☐ Apparent AZ & EL	18. ☐ Helio eclips. lon & lat	32. ☐ North pole RA & DEC
5. ☐ Rates; AZ & EL	19. ☐ Helio range & rng rate	33. ☐ Galactic latitude
6. ☐ Sat. X & Y, pos. ang	20. ☐ Obsrv range & rng rate	34. ☐ Local app. SOLAR time
7. ☐ Local app. sid. time	21. ☐ One-Way Light-Time	35. ☐ Earth->Site lt-time
8. ☒ Airmass	22. ☐ Speed wrt Sun & obsrvr	> 36. ☐ RA & DEC uncertainty
9. ☒ Vis mag. & Surf Brt	23. ☐ Sun-Obsrvr-Target angl	> 37. ☐ POS error ellipse
10. ☐ Illuminated fraction	24. ☐ Sun-Target-Obsrvr angl	> 38. ☐ POS uncertainty (RSS)
11. ☐ Defect of illumin.	25. ☐ Targ-Obsrv-Moon/Illum%	> 39. ☐ Range & Rng-rate sig.
12. ☐ Sat. angle separ/vis	26. ☐ Obsr-Primary-Targ angl	> 40. ☐ Doppler/delay sigmas
13. ☐ Target angular diam.	27. ☐ Pos. Ang.radius & -vel	
14. ☐ Obs sub-Ing & sub-lat	28. ☐ Orbit plane angle	

図 2.4

このページで取得したい情報の番号にチェックを入れる。今回は 1 の他に 3、8、9 を選択した。

1:ターゲットの位置情報

2:ターゲットのみかけの速さ

8:Airmass

9:ターゲットの絶対等級とみかけの等級

設定が終了したら Generate Ephemeris をクリックし、ターゲットの情報を表示させる。図 2.5 に例を示す。

```
*****
Date__ (UT) __HR:MN      R.A._ (ICRF/J2000.0) _DEC dRA*cosD d(DEC)/dt a-mass T-mag N-mag
*****
$SSOE
2011-Nov-23 00:00 *m 17 31 04.08 +19 49 56.5 -4.33892 13.20343 1.702 9.97 13.15
2011-Nov-23 01:00 *m 17 31 03.77 +19 50 09.7 -4.48464 13.18328 1.377 9.97 13.15
2011-Nov-23 02:00 *m 17 31 03.45 +19 50 22.9 -4.59129 13.15040 1.203 9.97 13.15
2011-Nov-23 03:00 *m 17 31 03.12 +19 50 36.1 -4.65047 13.10866 1.117 9.97 13.15
2011-Nov-23 04:00 *m 17 31 02.80 +19 50 49.1 -4.65704 13.06255 1.093 9.97 13.15
2011-Nov-23 05:00 *m 17 31 02.47 +19 51 02.2 -4.60949 13.01684 1.127 9.97 13.15
2011-Nov-23 06:00 * 17 31 02.15 +19 51 15.2 -4.50999 12.97630 1.226 9.97 13.15
2011-Nov-23 07:00 C 17 31 01.83 +19 51 28.2 -4.36429 12.94533 1.420 9.97 13.15
2011-Nov-23 08:00 N 17 31 01.53 +19 51 41.1 -4.18130 12.92769 1.783 9.97 13.15
2011-Nov-23 09:00 17 31 01.24 +19 51 54.0 -3.97251 12.92622 2.527 9.97 13.15
2011-Nov-23 10:00 17 31 00.97 +19 52 07.0 -3.75114 12.94265 4.510 9.97 13.15
2011-Nov-23 11:00 17 31 00.71 +19 52 19.9 -3.53130 12.97750 16.670 9.97 13.15
2011-Nov-23 12:00 17 31 00.47 +19 52 32.9 -3.32701 13.03001 n.a. 9.97 13.15
2011-Nov-23 13:00 17 31 00.24 +19 52 46.0 -3.15118 13.09822 n.a. 9.97 13.15
2011-Nov-23 14:00 17 31 00.03 +19 52 59.1 -3.01480 13.17909 n.a. 9.97 13.15
2011-Nov-23 15:00 17 30 59.82 +19 53 12.4 -2.92618 13.26873 n.a. 9.97 13.15
2011-Nov-23 16:00 17 30 59.61 +19 53 25.7 -2.89031 13.36263 n.a. 9.97 13.15
2011-Nov-23 17:00 17 30 59.41 +19 53 39.1 -2.90860 13.45599 n.a. 9.97 13.15
2011-Nov-23 18:00 17 30 59.20 +19 53 52.6 -2.97874 13.54405 n.a. 9.97 13.15
*****
```

図 2.5 ターゲットの情報の例

②分光標準星の決定と位置情報

本研究では IRAF を使って解析するので、IRAF のパッケージに登録されている分光標準星カタログにあるものを選択する。IRAF に登録されている分光標準星を図 2.6 に示したものである。

	名称	V 等級	スペクトル型
HR1544	オリオン座 π 2	4.36	A
HR3453	うみへび座 η	4.30	B
HR4468	コップ座 θ	4.70	B
HR4963	おとめ座 θ	4.38	A
HR5501	おとめ座 108 番	5.68	B
HR718	くじら座 xi2	4.28	B
HR7596	わし座 56 番	5.62	A
HR7950	みずがめ座 η	3.78	A
HR8634	ペガサス座 ζ	3.40	B
HR9087	うお座 29 座	5.12	B

図 2.6 分光標準星のリスト

分光標準星はターゲットと同じ空、同じ高度で分光する。しかし、これはあくまで理想なので、実際は分光標準星をさまざまな高度で分光してする必要がある。分光標準星の位置情報はプラネタリウムソフト「GUIDE8」で調べた。このソフトで分光標準星の高度変化をメモしておくといよい。

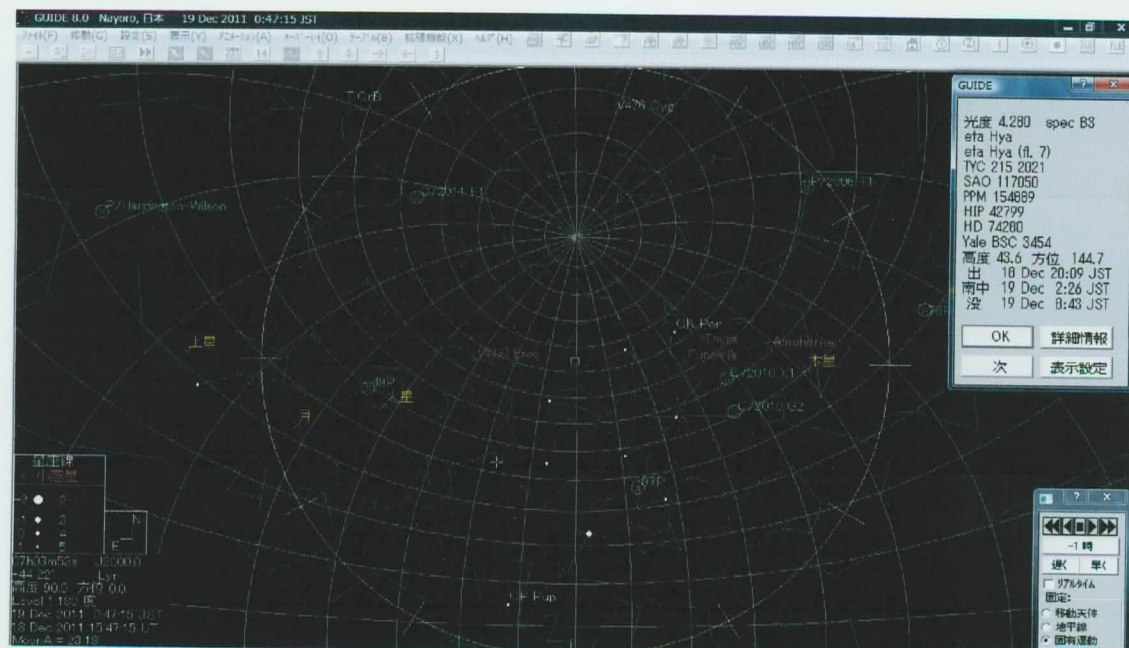


図 2.7 GUIDE8

2.3 観測手順

①分光器の取り付け

観測所に到着したら、まず分光器を取り付ける。手順は以下の通りに行なった。

1. 分光器をカセグレン台の取り付け口にはめ込み、2点ネジで固定する。
2. 冷却 CCD の電源ケーブルと USB ケーブル、スリットビューワー用の CCD カメラの電源ケーブルと同軸ケーブルを配線し、接続する。
3. CCDOPS を起動し CCD カメラを冷やす。
4. スリットビューワーのピントを合わせる。

②ピリカ望遠鏡の立ち上げる

分光器の取り付けが完了したら、ピリカ望遠鏡の立ち上げとドームの環境を整える。手順は以下の通りである。

- (1)ドーム内にある除湿機とピリカ望遠鏡のミラーセルフファンを停止させる。そして、ドーム内の窓を全て開けて、ドームないと外気の温度を同じにする。
- (2)ピリカ望遠鏡のサーバと Linux-PC、Windows-PC のサーバを起動させる。
- (3)Linux-PC の方で「GNOME 端末」を開き、“telescope”ディレクトリのもとで“./telescopeM4”とコマンドを打ち Linux-PC とピリカ望遠鏡をリンクさせる。
- (4)Linux-PC の方で「GNOME 端末」を開き“casif m4x in”とコマンドを打ち、ミラーを入れる、次に“casif m4r PORT4”とコマンドを打ち、ミラーの角度をカセグレン焦点に向ける。
- (5)Window-PC で「Master of Telescope 2011A01」を開き、“原点復帰”をクリックしピリカ望遠鏡を原点復帰させる。

③天体の導入

ピリカ望遠鏡ターゲットに導入させるためには、Linux-PC でターゲットの位置情報ファイルをつくり、その位置情報ファイル通りに望遠鏡を動かすことができる。導入方法は以下の通りである。

(1) 位置情報ファイルの作成する

ターゲットの位置情報ファイルのような位置情報は 2.2 と同じく、JPL HORIZON から取得する。まず、Linux-PC の方で JPL HORIZON のページを開き、Current Setting の設定を行う。設定は 2.2 と異なり図 2.7 のように設定する。

Current Settings

Ephemeris Type [change] : OBSERVER
Target Body [change] : Comet C/2009 P1 (Garradd)
Observer Location [change] : Geocentric [500]
Time Span [change] : Start=2011-12-4, Stop=2011-12-5, Step=1 m
Table Settings [change] : QUANTITIES=1,20
Display/Output [change] : default (formatted HTML)

図 2.7

Observe Location : Geocentric (500) にと入力する。

Time Span : より細かな位置情報が欲しいので1分ごとに設定する。

Table Setting : 1 番、20 番だけを選択する。

Display/Output : plain text と設定し、テキストファイルとして表示させる。

以上のように設定した位置情報を図 2.8 に示す。

```
*****
Date__ (UT) __HR:MN      R.A. _ (ICRF/J2000.0) _DEC          delta      deldot
*****
$$SOE
2011-Dec-04 00:00      17 30 22.72 +21 01 36.6 2.10952612881472  -3.5214394
2011-Dec-04 00:01      17 30 22.72 +21 01 37.0 2.10952471634580  -3.5218139
2011-Dec-04 00:02      17 30 22.72 +21 01 37.3 2.10952330372671  -3.5221883
2011-Dec-04 00:03      17 30 22.72 +21 01 37.6 2.10952189095742  -3.5225628
2011-Dec-04 00:04      17 30 22.72 +21 01 37.9 2.10952047803795  -3.5229372
2011-Dec-04 00:05      17 30 22.72 +21 01 38.3 2.10951906496829  -3.5233117
2011-Dec-04 00:06      17 30 22.72 +21 01 38.6 2.10951765174844  -3.5236862
2011-Dec-04 00:07      17 30 22.72 +21 01 38.9 2.10951623837839  -3.5240606
2011-Dec-04 00:08      17 30 22.72 +21 01 39.3 2.10951482485816  -3.5244351
2011-Dec-04 00:09      17 30 22.71 +21 01 39.6 2.10951341118774  -3.5248095
2011-Dec-04 00:10      17 30 22.71 +21 01 39.9 2.10951199736713  -3.5251840
2011-Dec-04 00:11      17 30 22.71 +21 01 40.2 2.10951058339633  -3.5255584
2011-Dec-04 00:12      17 30 22.71 +21 01 40.6 2.10950916927534  -3.5259329
2011-Dec-04 00:13      17 30 22.71 +21 01 40.9 2.10950775500416  -3.5263074
2011-Dec-04 00:14      17 30 22.71 +21 01 41.2 2.10950634058279  -3.5266818
2011-Dec-04 00:15      17 30 22.71 +21 01 41.6 2.10950492601124  -3.5270563
2011-Dec-04 00:16      17 30 22.71 +21 01 41.9 2.10950351128949  -3.5274307
2011-Dec-04 00:17      17 30 22.71 +21 01 42.2 2.10950209641756  -3.5278052
2011-Dec-04 00:18      17 30 22.71 +21 01 42.6 2.10950068139544  -3.5281796
2011-Dec-04 00:19      17 30 22.70 +21 01 42.9 2.10949926622313  -3.5285541
```

図 2.8 位置情報ファイル用の位置情報

そして、図 2.8 のテキストファイルを “dat” 拡張子で “horizon” ディレクトリに保存する。

次に、このテキストファイルの頭の部分を削除する。Linux-PC のメニューバーにある「アプリケーション」の「アクセサリ」から「GNOME テキストエディタ」を開き、図 2.8 の位置情報ファイルの頭の行～「\$ \$ SOE」の行まで削除し、編集後のファイルを保存する。

最後にメニューバーにある「GNOME 端末」で、あらかじめ作成したヘッダファイルの下に位

置情報ファイルを落とす操作をする。コマンド操作を以下に示す。

1.” cd horizon ”ディレクトリに行く

2.” cat head ファイル名:/makeNonSidfile.pl 位置情報ファイル名 |tee 新しいファイル名 ”
でヘッダファイルの下に位置情報ファイルが落ちる。
これでターゲットの位置情報ファイルの完成である。

(2) 位置情報ファイルをもとに望遠鏡を動かす

” sols ”ディレクトリに” ./sols ”という位置情報ファイル通りに望遠鏡を動かすことができる。具体的な手順は以下の通りである。

1. “ cp ~/horizon/位置情報ファイル名 . ” で ” sols ”ディレクトリに位置情報ファイルをコピーする。

2. ” ./sols 位置情報ファイル名 ”で望遠鏡がターゲットの位置情報ファイルをもとに望遠鏡が動く。

(3)天体をスリットに入れる

位置情報ファイル通りに望遠鏡を動かしても、望遠鏡のポインティング性能やJPL HORIZONの位置情報にも誤差があるので、ぴったりスリットに天体が入るとは限らない。なので、UFOキャプチャーのモニターを見ながら「Master of Telescope 2011A01」の画面上にあるオフセットを調節し、スリットに天体を入れる。

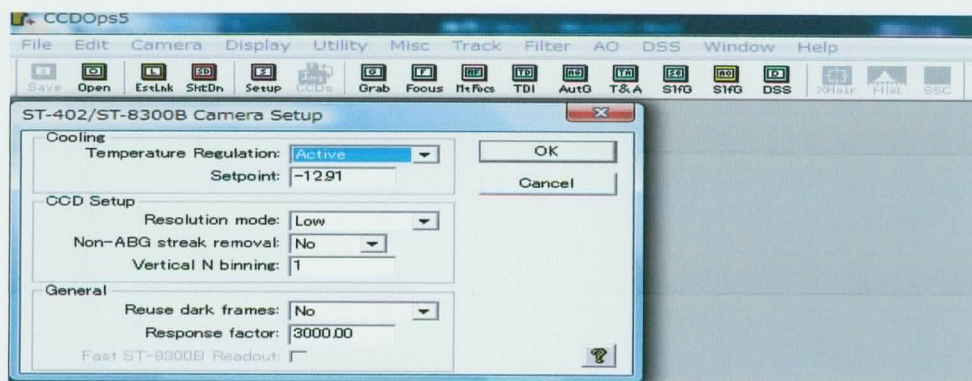


図 2.12 : 温度設定画面

(2) ビニングモードの設定

ビンニングとはCCDチップ上で隣り合うピクセルをひとまとまりにして見かけ上大きな1つのピクセルにすることをいう。図 2.14 に模式図を示す。

1×1のビンニングに比べ2×2のビンニングは受光面積が4倍なので感度もその分良くなる。同じように3×3のビンニングは受光面積が9倍なので9倍感度が良くなる。しかし、感度がよくなるかわりに天体の画像の鮮明さを示す解像度が低くなるので目的にあったビンニング設定が必要になる。本研究では3×3ビンニングモードで行なった。ビンニングモードの設定は温度設定と同じ図 2.12 画面の“Resolution mode”で設定できる。各モードの設定内容を下の表に示す。

モード	ビンニング	解像度 (画素数)	1 画素のサイズ
High	1×1	765×510	9×9
Medium	2×2	382×255	18×18
Low	3×3	255×170	27×27
1×N	4×4	765×510	9×9
2×N	2×1	382×510	18×9
3×N	3×1	255×510	27×9
Ultra Low	9×9	85×56	81×81

本研究の分光器では、モードを Low または 3×N に設定するのが好ましい。

(3)露出時間を決める (exposure time)

撮像を開始するにあたって撮像からシャッターを切るまでの時間を露出時間という。シグナルをたくさん得ることは大切であるが、露出時間が長すぎるとサチュレーションという光漏れをおこしてしまいデータとして使えなくなってしまう。天体の等級に合わせた露出時間を設定してあげることが大切である。露出時間の設定はメニューの「Grab」をクリックし、exposure time の欄に露出時間の数値を入力すればよい。その下に “” とある。also ダークフレームとライトフレーム（天体の画像）を同時に取得するか、only ダークフレームのみにするか、none ライトフレームのみにするかを選択することができる。

(4)分光データの確認と保存

設定した露出時間を経過すると CCDOPS の画面に天体が分光された画像が表示される。表示されたデータのカウンタ数とノイズ確認をする。CCDOPS のメニュー”Display “にある” Show Horizontal Profile ”を選択するとデータの画像上に四角囲みのポイントが現れる。これをマウスで動かすことで各々のピクセルのカウンタ値とノイズを見ることができる。ここでサチュレーションをおこしていないか確認すると良い。

確認が終わったらデータを保存する。保存の際、データの拡張子を”fit”拡張子として保存しなければ解析できない。保存方法はメニューにある”save”を選択したら、図 2.16 の保存設定画面があるので、保存先とファイル名を入力し、拡張子を “” で “Fit “拡張子に変更して「OK」をクリックするとできる。ここで拡張子を間違えるとデータとして使用できない場合があるので最新の注意をする。

続いて取得したデータの解析を行う。

Ⅲ 解析

・ IRAF について

今回用いた解析ソフトは NOAO (National Optical Astronomy Observatory) が開発した、IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) を用いた。

IRAF は Unix 系の OS 向けに作成されたものであり、一次処理や解析を行う際にコマンドを打ち込んでいかなければならない。

また、解析を進めていくにあたって、解析が正確に行われているかたしかめるためにデータの画像を見ながら進めていかなければならない。画像を表示するためのソフトウェアが DS9 である。本研究では DS9 に表示された画像を見ながら IRAF で解析を行なった。

3.1 一次処理

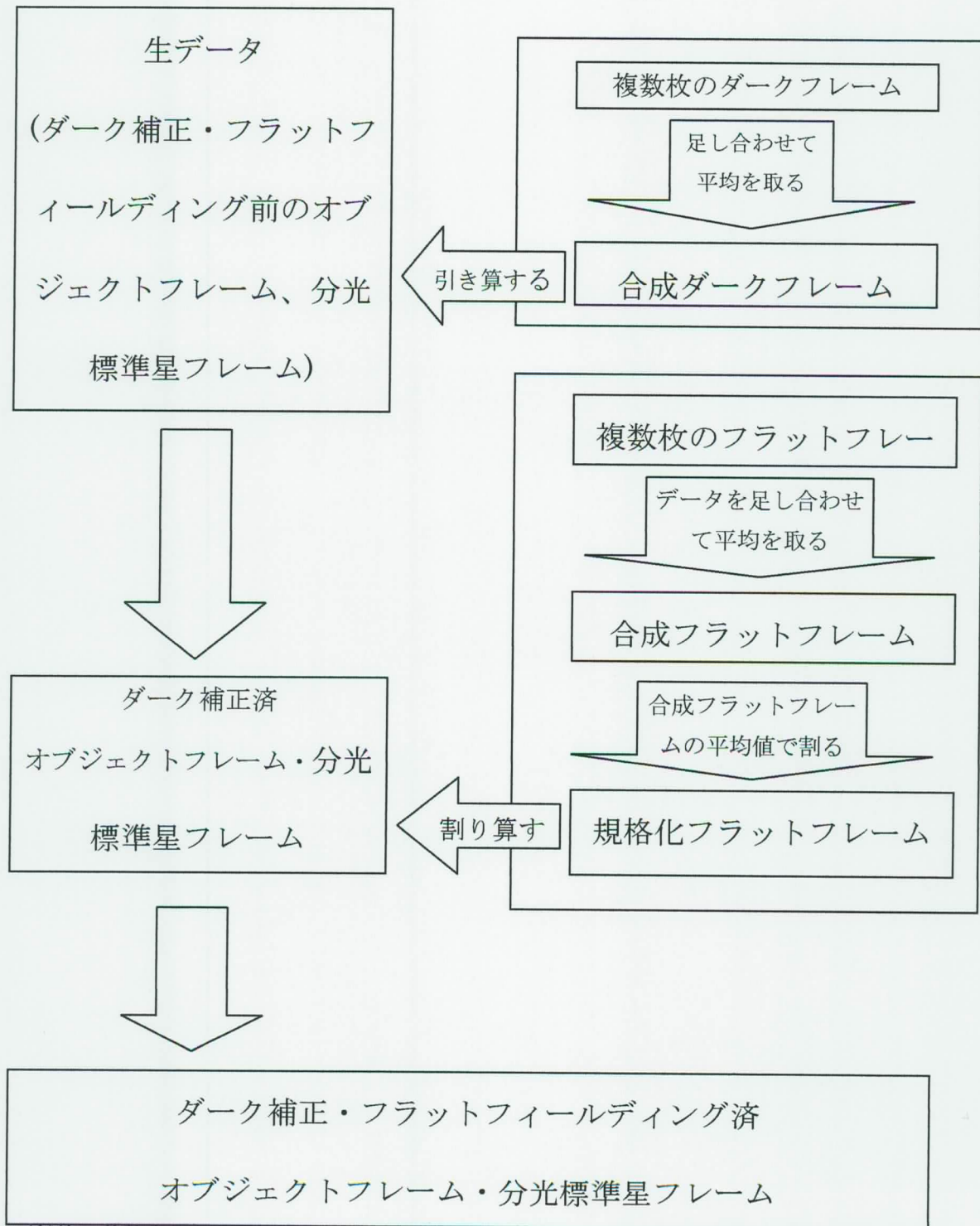
1.1 本研究で取得したデータリスト

天体名	開始時刻	露出時間	ディレクトリ	ファイル名(fit)	AIRMASS	備考
	JST	second				
HR3454	24:12	4	Hr3454	Hr3454_3	1.362	
Dark×10	24:12	4	Hr3454_dark	Hr3454_dark0??	-	
HR1544	24:18	4	Hr1544	Hr1544_4	1.667	
Dark×10	24:18	4	Hr1544_dark	Hr1544_dark0??	-	
HR4468	24:45	5	Hr4468	Hr4468_3	2.867	
Dark×10	24:45	5	Hr4468_dark	Hr4468_dark0??	-	
HR1544	01:05	6	Hr1544_2	Hr1544_6	2.044	
Dark×10	01:05	6	Hr1544_dark2	Hr1544_dark20??	-	
HR1544	02:19	10	Hr1544_3	Hr1544_8	3.569	
Dark×10	02:19	10	Hr1544_dark3	Hr1544_dark30??	-	
HR4468	02:35	15	Hr4468	Hr4468_5	1.860	
Dark×10	02:35	15	Hr4468_dark	Hr4468_dark20??	-	
HR4963	02:59	30	Hr4963	Hr4964_2	2.044	
Dark×10	02:59	30	Hr4963_dark	Hr4963_dark0??	-	
Garradd	05:23	2400	Obj	Garradd_4	1.682-1.416	
Dark	05:23	2400	Obj	Garradd_dark	-	
Flat×10	06:56	1	Flat_none	Flat_none0??	-	
Dark×10	07:00	1	Flat_dark	Flat_dark0??	-	
Comp_ne	07:05	2	Ne	Ne_2	-	
Comp_hg	07:11	15	Hg	Hr_2	-	

表 1 : 取得したデータリスト

1.2 一次処理

分光した画像データはそのまま解析に用いることはできず、一次処理をしなければならない。一次処理とは、ダークノイズ補正、バイアス補正、フラットフィールドイングを指し、*iraf* を使って行う。一次処理をしていないオブジェクトフレームのことを生データという。一次処理の考えとしては以下のようなものである



生データには天体からのカウント(シグナル)と天体以外からのカウント(ノイズ)がある。ノイズは以下のものがある。

暗電流ノイズ: 電子の熱運動によって生じるノイズ。その大きさは露出時間と冷却温度に左右される

バイアスノイズ: 露出時間 0 秒で撮像したときに発生するノイズ。

読み出しノイズ: データを読み出すときに発生するノイズ

これらのノイズを生データから引き算することにより純粋な天体からのシグナルのみのオブジェクトフレームにすることができる。一次処理が必要なフレームはオブジェクトフレーム、分光標準星フレーム、フラットフレームである。ダークフレームの取得方法は取得したデータと同じ露出時間、CCD チップ温度でダークフレームを取得する

。



図 3.1 : ダークフレームの様子

②フラットフィールドイング

CCD カメラのピクセルごとに光の感度が異なる。これを感度ムラがあるともいう。この感度ムラを補正することをフラットフィールドイングという。

フラットフィールドイングするには一様な光を検出器(冷却 CCD)に当てたフラットフレームが必要である。フラットフレームは観測のはじめと終わりに取得し、複数枚用意しておくが良い。

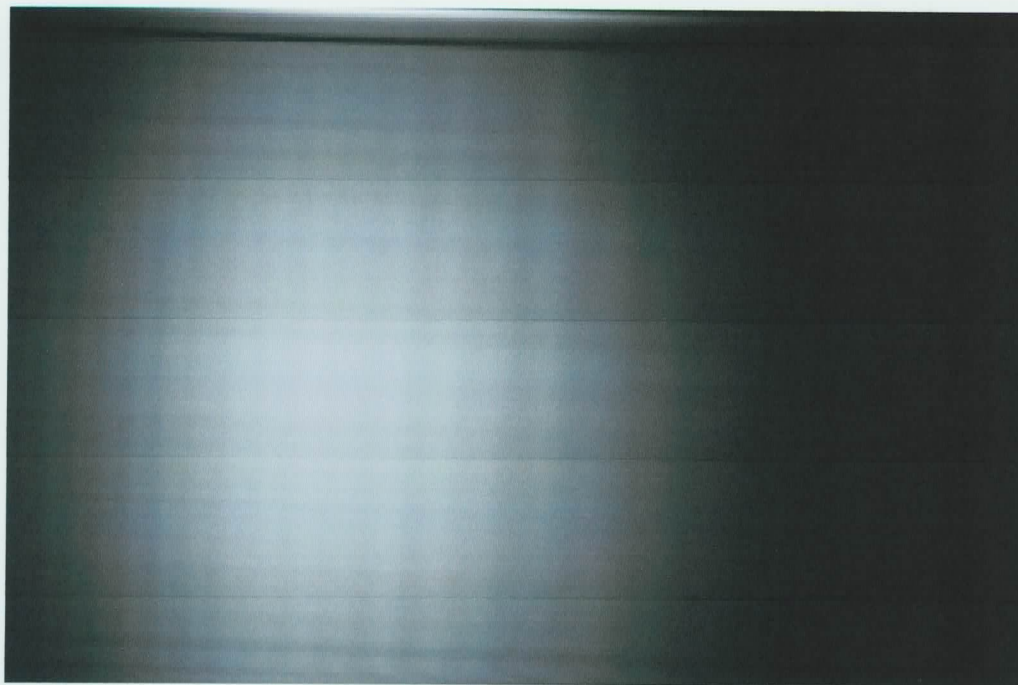


図 3.2:フラットフレームの様子

③IRAF を使ってダーク補正、フラットフィールドイングを行う

ここでは実際に IRAF 上でのコマンド操作を示しながら、ダーク補正、フラットフィールドイングの方法を説明していく

(1)合成ダークフレームの作成 : imcombine

ダークフレームは 1 枚だけでは取得したデータのノイズと同じノイズを再現できないので、複数枚取得したダークフレームを加算平均しできるだけデータのノイズに近いものにする。

flat_dark001~flat_dark010 の 10 枚のフラットフレームを例に合成ダークフレームを作成の手順を示す。

まず、フラットフレームのある flat_dark ディレクトリに入る。作業をするディレクトリに移動するには“cd+ディレクトリ名”で移動できる。また、ディレクトリに“ls”とコマンドを入力すると、現在いるディレクトリのファイルリストを表示できる。(図 3.3)

```
onedspec> cd flat_dark/  
onedspec> ls  
flat_dark.fits          flat_dark004.fit*    flat_dark008.fit*  
flat_dark001.fit*       flat_dark005.fit*    flat_dark009.fit*  
flat_dark002.fit*       flat_dark006.fit*    flat_dark010.fit*  
flat_dark003.fit*       flat_dark007.fit*  
onedspec> █
```

図 3.3:flat_dark ディレクトリにあるファイルリスト

flat_dark001~flat_dark010 がフラットフレーム用のダークフレームでこれらを加算平均

する。加算平均に用いるタスクは“imcombine”でこのタスクのパラメータを以下の用に設定した。

```

xterm
IRAF
Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = immatch
TASK = imcombine

input = flat_dark0??,fit List of images to combine
output = flat_dark List of output images
(headers= ) List of header files (optional)
(bpmasks= ) List of bad pixel masks (optional)
(rejmask= ) List of rejection masks (optional)
(nrejmas= ) List of number rejected masks (optional)
(expmask= ) List of exposure masks (optional)
(sigmas = ) List of sigma images (optional)
(logfile= STDOUT) Log file

(combine= average) Type of combine operation
(reject = sigclip) Type of rejection
(project= no) Project highest dimension of input images?
(outtype= real) Output image pixel datatype
(outlim= ) Output limits (x1 x2 y1 y2 ...)
(offsets= none) Input image offsets
(masktype= none) Mask type
(maskval= 0) Mask value
(blank = 0.) Value if there are no pixels

(scale = none) Image scaling
(zero = none) Image zero point offset
(weight = none) Image weights
(statsec= ) Image section for computing statistics
(expname= ) Image header exposure time keyword

(lthresh= INDEF) Lower threshold
(hthresh= INDEF) Upper threshold
(nlow = 1) minmax: Number of low pixels to reject
(nhigh = 1) minmax: Number of high pixels to reject
(nkeep = 1) Minimum to keep (pos) or maximum to reject (neg)
(mclip = yes) Use median in sigma clipping algorithms?
(lsigma = 1.) Lower sigma clipping factor
(hsigma = 1.) Upper sigma clipping factor
(rdnoise= 0.) cddclip: CCD readout noise (electrons)
(gain = 1.) cddclip: CCD gain (electrons/DN)
(snoise = 0.) cddclip: Sensitivity noise (fraction)
(sigscal= 0.1) Tolerance for sigma clipping scaling corrections
(pclip = -0.5) pclip: Percentile clipping parameter
(grow = 0.) Radius (pixels) for neighbor rejection
(mode = ql)

:go

```

図 3.4 : imcombine のパラメータ設定

“eparameter+imcombine”で図 3.4 が表示される。パラメータの設定が必要な項目は

“input” “output” “combine” で “input” には「加算平均するファイル名」、図 3.4 で “input” の項目に “flat_dark0??fit” と入力している。これは “flat_dark0” が含まれているファイル名を使うようにすることを意味している。flat_dark ディレクトリのリストでは flat_dark001~flat_dark010 が当てはまる。(図 3.3 を参照) いちいち 10 個ファイルを入力するのは苦勞するのでこのようにコマンドを入力すると便利である。

そして “output” に「加算平均後の新しいファイル名」を入力し、“combine” には、平均値を取る(average)か中央値(median)を取るか選択する。今回は平均値(average)をとるようにした。パラメータの設定ができたなら “:go” で加算平均を行い、結果が表示される。(図 3.5)

```
Jan 10 11:35: IMCOMBINE
combine = average, scale = none, zero = none, weight = none
reject = sigclip, mclip = yes, nkeep = 1
lsigma = 1., hsigma = 1.
blank = 0.

Images
flat_dark001.fit
flat_dark002.fit
flat_dark003.fit
flat_dark004.fit
flat_dark005.fit
flat_dark006.fit
flat_dark007.fit
flat_dark008.fit
flat_dark009.fit
flat_dark010.fit

Output image = flat_dark, ncombine = 10
ec1> ls
flat_dark.fits          flat_dark003.fit*    flat_dark006.fit*    flat_dark009.fit*
flat_dark001.fit*       flat_dark004.fit*    flat_dark007.fit*    flat_dark010.fit*
flat_dark002.fit*       flat_dark005.fit*    flat_dark008.fit*
ec1> █
```

図 3.5 : flat_dark0??fit 加算平均の結果

これで合成ダークフレームが作成された。

フラットフレームと同じようにオブジェクトフレーム、分光標準星フレーム用の合成ダークフレームを作成する。

(2) 合成フラットフレームの作成: imcombine

ダーク補正を行う前に合成フラットフレームの作成方法を示す。合成フラットフレームも合成ダークフレームと同じように複数枚のフラットフレームを加算平均したものである。フラットフレームは各ピクセルの感度ムラを補正するものだが、1枚だけでは正確な感度ムラを再現できない。これはフラットフレームごとに感度ムラの程度が違うからである。加算平均することにより正確な感度ムラを再現することができる。IRAF 上での作業は以下のように行なっていく。

まず、フラットフレーム “flat_none” ディレクトリに入る。ここで合成ダークフレームと同じように “imcombine” タスクを用いて加算平均する。パラメータの設定を合成ダークフレーム作成と同じように設定する。

「imcombine input ファイル名 outoput ファイル名」

注)タスクとファイル名、ファイル名とファイル名の間にはスペースを入力する

と入力してすると加算平均され、その結果が表示される。

```
ecl> cd ../
ecl> ls
flat_dark/      flat_none/
ecl> cd flat_none/
ecl> ls
flat_none001.fit*  flat_none004.fit*  flat_none007.fit*  flat_none010.fit*
flat_none002.fit*  flat_none005.fit*  flat_none008.fit*
flat_none003.fit*  flat_none006.fit*  flat_none009.fit*
ecl> imcombine flat_none0??.fit flat_none.fit

Jan 10 11:36: IMCOMBINE
  combine = average, scale = none, zero = none, weight = none
  reject = sigclip, mclip = yes, nkeep = 1
  lsigma = 1., hsigma = 1.
  blank = 0.
    Images
    flat_none001.fit
    flat_none002.fit
    flat_none003.fit
    flat_none004.fit
    flat_none005.fit
    flat_none006.fit
    flat_none007.fit
    flat_none008.fit
    flat_none009.fit
    flat_none010.fit

  Output image = flat_none.fit, ncombine = 10
ecl> █
```

図 3.6 : flat_none0??.fit 加算平均の結果

(3)ダーク補正する : imarith

次にオブジェクトフレーム、分光標準星フレーム、合成フラットフレームをダーク補正する。オブジェクトフレームを例に、以下に IRAF 上での作業を示す。

まず、オブジェクトフレームのある“obj”ディレクトリに入る。そして、garradd_4.fit 用の合成ダークフレームを obj ディレクトリにコピーする。以下のようにコマンドを入力する。

「cp ~/ディレクトリ名/ファイル名」.

コピーしたら“imarith”タスクで、以下のように入力するとダーク補正される。

「imarith ダーク補正するファイル名 - 合成ダークフレーム名」

同じように分光標準星フレームと合成フラットフレームでもダーク補正を行う。

ダーク補正前と後の garradd を DS9 上で表示した様子は以下のようなものである。

DS9 に画像を表示するには、DS9 のアイコンをクリックし DS9 を開き、IRAF で

「display ファイル名」

で表示される。

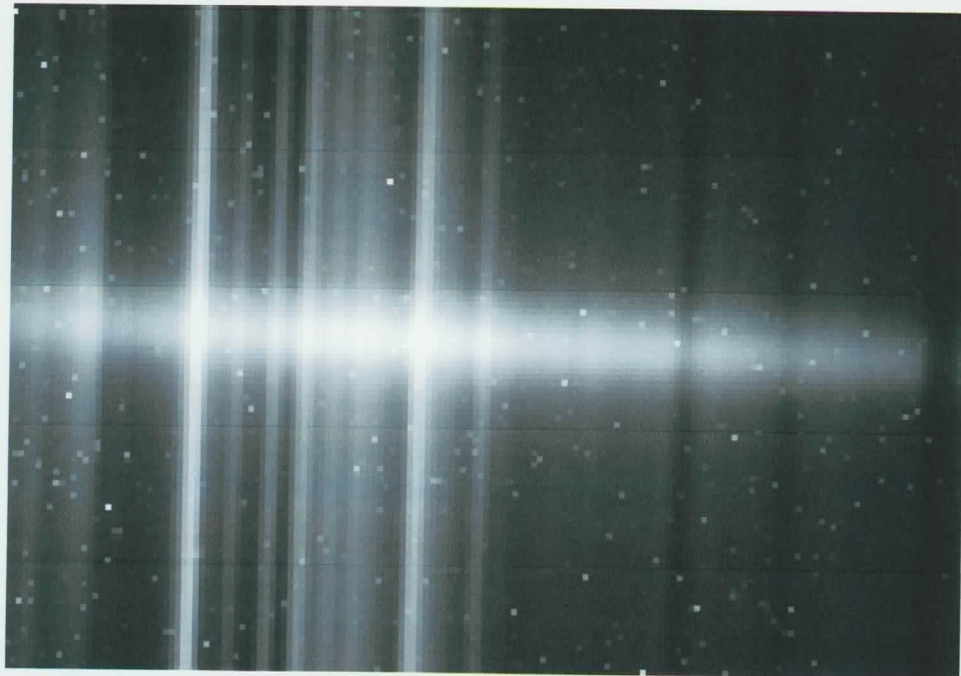


図 3.7 : garradd 彗星のダーク補正前

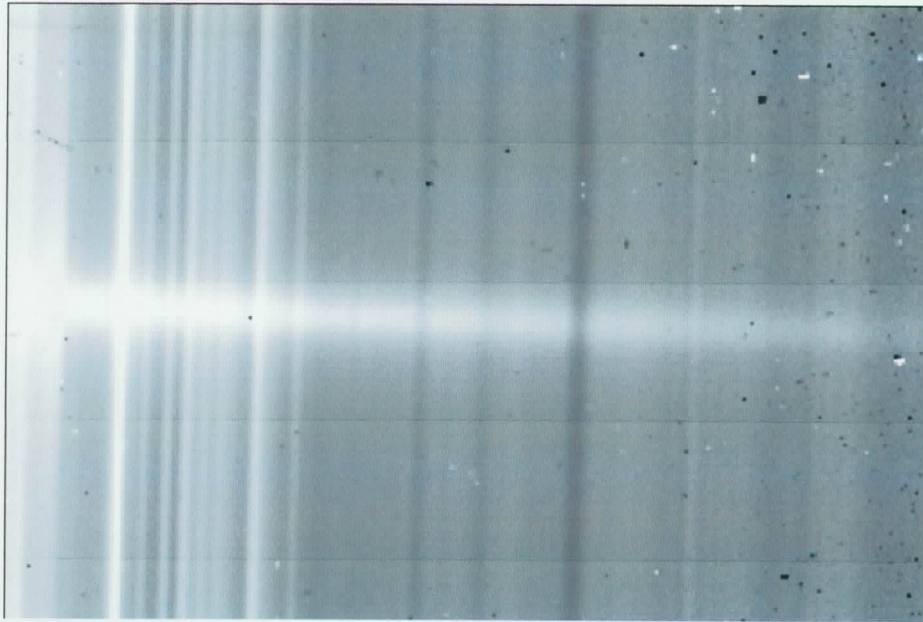


図 3.8 : garradd 彗星のダーク補正後

画像の縦方向：空間方向、横方向：波長方向である。いくつか輝線スペクトルがみられるが、空間方向に一様に明るいのが名寄市街の光である。空間方向に一様でない輝線スペクトル（画像左端がわかりやすい）が彗星コマの輝線スペクトルである。縦方向の中央付近から波長方向に伸びているスペクトルが彗星核から放出したダストが太陽光を反射した光で連続スペクトルである。また、地球大気の吸収、暗線もみられる。

図 3.7 を見ると白い点が沢山ある、これは宇宙船イベントやノイズによりカウント数が異常に大きくなってしまった部分である。図 3.8 を見るとそれらがなくなっているのがわかる。

(4)フラットフィールドイング

ダーク補正が済んだら次にオブジェクトフレームと分光標準星フレームの感度ムラを補正する。フラットフィールドイングに用いるデータは先ほど作成した合成フラットフレームである。しかし、合成フラットフレームで割ってしまうと各ピクセルのカウント値が大きすぎてオブジェクトフレームや分光標準星フレームのカウント数を著しく減少してしまう。ここで、合成フラットフレームをその平均値で割り規格化する。このフラットフレームを規格化フラットフレームという。規格化フラットフレームは平均値で割られているため平均値が1となる。つまり、平均値1を基準として各ピクセルの感度がその比率で表されるため極端にカウント数が減少しない。IRAF上で以下のようにフラットフィールドングを行なっている。

まず、合成フラットフレームのある **flat_noen** ディレクトリに入る。ここで、合成フラットフレーム **flat_none.fit** の平均値を調べる。コマンドは以下の用に入力する。

「imstat ファイル名」

すると、ステータスが表示される。MEAN と表記されているのが平均値でこの数値で合成フラットフレームを割る。コマンドは以下のように入力する。

imarith ダーク補正済オブジェクトフレームのファイル名 / 合成フラットフレームの平均値

これで規格化フラットフレームが作成される。

合成フラットフレームと規格化フラットフレームのステータスを図 3.8 に示す。

```
ec1> imstat flat_d.fit
#          IMAGE      NPIX      MEAN      STDEV      MIN      MAX
          flat_d.fit    43350    10887.    6236.      759.    29191.
ec1> imarith flat_d.fit / 10887 flat.fit
ec1> imstat flat.fit
#          IMAGE      NPIX      MEAN      STDEV      MIN      MAX
          flat.fit    43350      1.    0.5728    0.06972    2.681
ec1> █
```

図 3.8 flat_none_d.fit のステータスと flat.fit のステータス

規格化フラットフレームを「cp ~/ディレクトリ名/規格化フラットフレームのファイル名」と入力し、各ディレクトリにコピーして、フラットフィールドイングを行う。コマンドは以下のように入力する。

「**imarith** ダーク補正済オブジェクトフレーム・分光標準星フレーム / 規格化フラットフレーム」

これで、感度ムラが補正される。同じように分光標準星フレームもフラットフィールドイ

ングを行う。フラットフィールドニング後の画像は以下のようになった。



図 3.9 : garradd_d.fit のフラットフィールドニング後の画像
多少ではあるが感度ムラが修正されたため図 3.7 に比べると
画像の映りがよくなった部分があるのがわかる。いくつかあ
る黒い点は感度が悪いピクセル部で BAD ピクセルと言われ
るものである。

ここまでが一次処理である。

3.2 解析

2.1 解析の流れ

解析は波長較正→(一次元化)→波長感度補正の手順で行なっていく。それぞれの過程でのタスクとその役割についておって説明していく。なお、タスクはパッケージという工具箱のようなものに入っており、タスクは工具箱に入っているペンチやドライバーのようなものと捉えてよい。それぞれの解析にあった工具箱をコマンド入力で用意しタスクを正確に使用していくようなイメージで IRAF 作業していく。解析の流れを以下に示す。

2.2 波長較正

波長較正前のオブジェクトフレームは横軸: ピクセル(ピクセル位置)、縦軸: 空間方向(ピクセル位置)となっている。これをアルゴンランプ、ネオンランプ、水銀ランプといった波長が正確に同定されている光源(コンパリソンプという)を分光したデータ(コンパリソンプフレームという)を用いて、横軸: 波長(Å) 縦軸: 空間方向(ピクセル位置)に変換する。また、オブジェクトフレームの画像は分光器の仕様で傾いていてしまうので、縦軸によって横軸方向のピクセルと波長の関係が異なる、その傾きを補正することも含めて波長較正という。

波長較正にはパッケージ"twodspec→longslit"にある"identify、reidentify、fitcoord、transform"を用いて、以下の手順で行なった。

①波長同定する: idetify

"twodspec"→"longslit"と入力し、波長較正に必要なパッケージを用意する。まず、"identify"タスクで水銀ランプとネオンランプを分光して取得したコンパリソンプフレーム(ne_2.fit と hg_2.fit)を使って波長を同定する。図 3.10 図 3.11 を見ると ne_2.fit は短波長側に輝線が偏り、hg_2.fit は長波長側に輝線が偏っている。これらの輝線の波長を明らかにしていくわけだが、波長同定は短波長から長波長までまんべんなく同定しないと正確に横軸のピクセルが波長に変換できないので両者のデータを足し合わせる必要がある。なので、"imarith"タスクで足し合わせたデータ(hgne.fit)を作りこれを用いた。(図 3.12 参照)

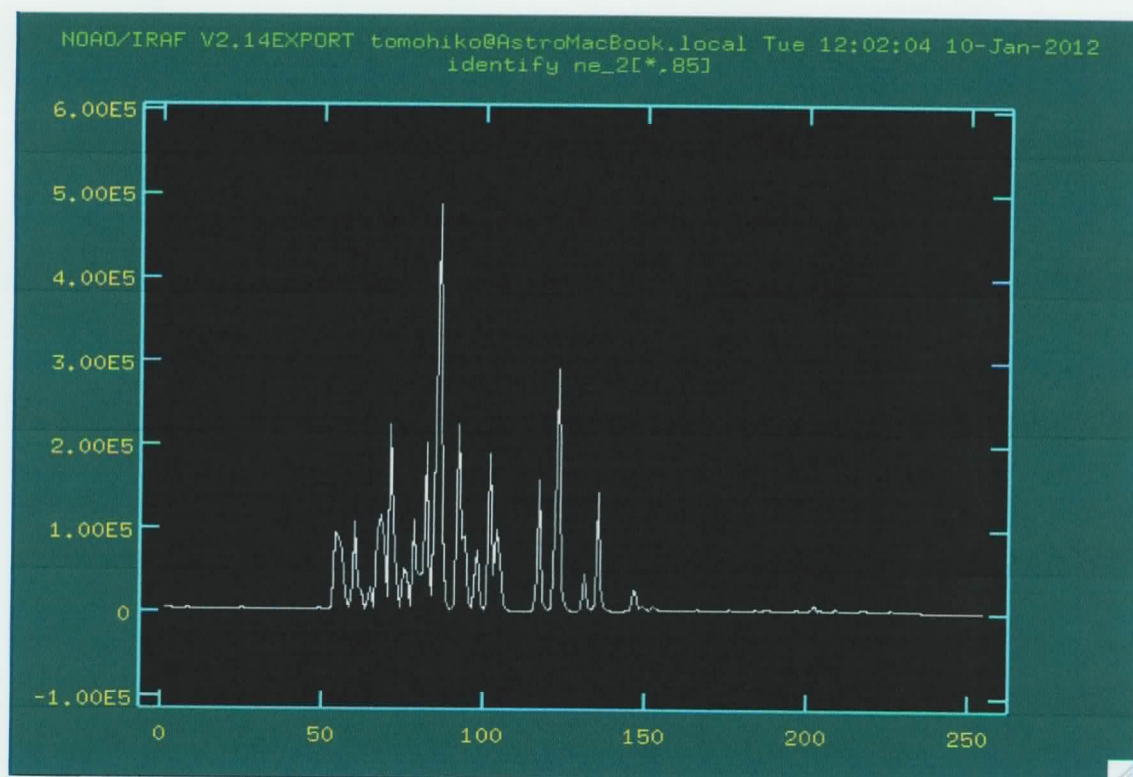


図 3.10 : ne_2.fit のスペクトル

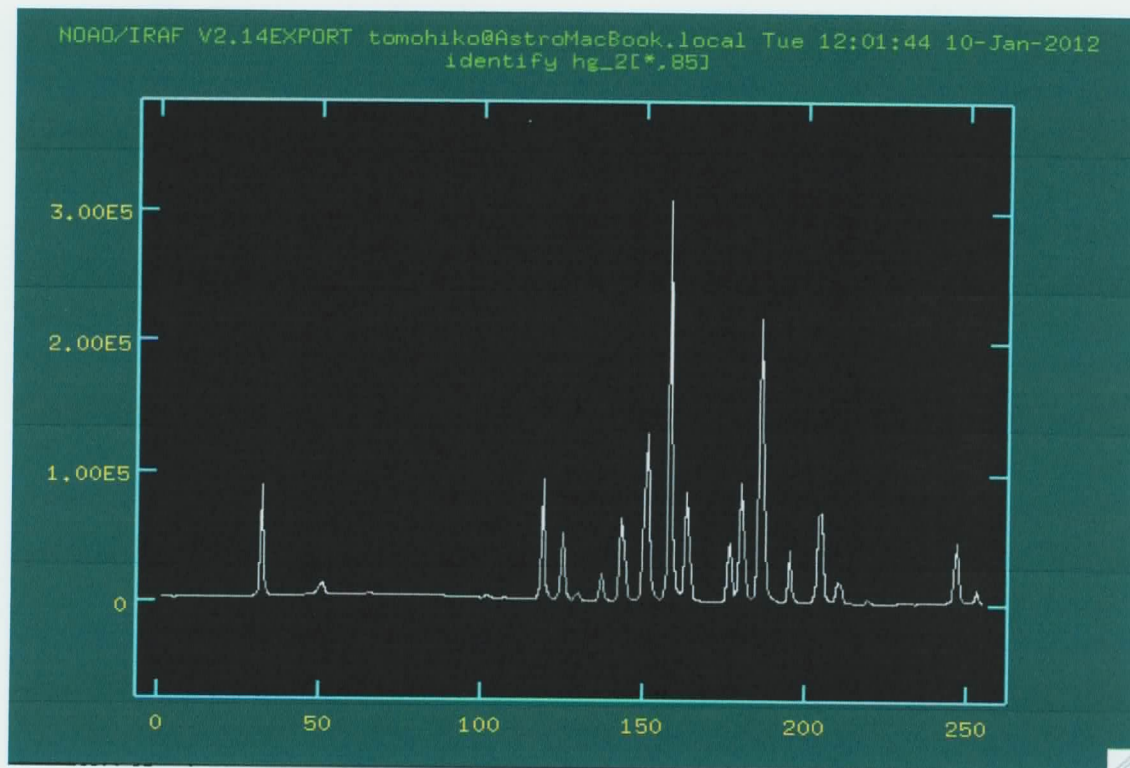


図 3.11 : hg_2.fit のスペクトル

次に、波長同定をする。「hgne.fit」ファイルを波長同定するので、

「identify hgne.fit」

と入力する。すると、グラフが表示される。(図 3.12 を参照)

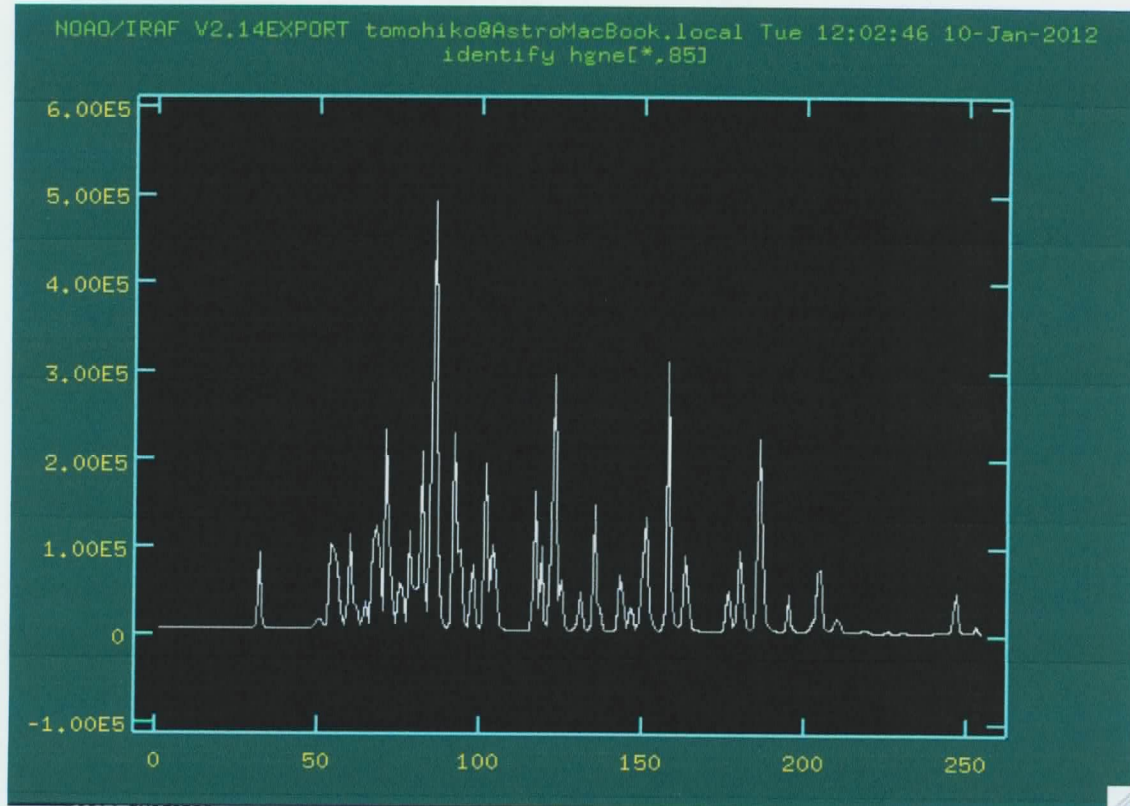


図 3.12：ネオンランプと水銀ランプを足し合わせたコンパリソフフレーム

このグラフはコンパリソフフレームの縦軸：空間方向（ピクセル位置）の 85 ピクセルから横軸に沿って切り出したもので。横軸：ピクセル番号、縦軸：カウント数となっている。また、Y 軸方向に伸びた線があるがこれがコンパリソフランプ特有の輝線スペクトルである。この輝線スペクトルにカーソルを合わせて“m”を入力すると波長を単位 Å として入力するように指示される。ここで、理科年表や誰かがすでに波長同定したデータを参照しながら波長の入力を繰り返していき、波長同定を行なっていく。今回用いた資料を図 3.13 と図 3.14 である。

ある程度波長同定して“f”を押すと、図 3.15.2 の画面が切り替わり、関数フィッティングの結果が表示される。このグラフは波長同定の正確さを示したものである。横軸：ピクセル（ピクセル位置）、縦軸：残差である。「+」は同定した X 座標の残差を示しており、点線からずれている「+」は正確に同定出来ていない横軸のピクセルの位置を示している。なので、カーソルをそこまでもっていき“d”と押すと削除される。そして、“f”と押すと再び削除した部分を抜きにした波長同定の正確さを示してくれる。グラフの頭にある「RMS」の数値が正確性を示しており値が小さいほど波長同定がうまくいっていることになる。ある程度正確に波長同定できたら、残差の図のグラフ上で“q”を押して一つ戻りもう一回押すと波長同定を終了し、波長同定したファイルが“database”ディレクトリに保存される。今回用いた波長同定の結果を以下に示す。

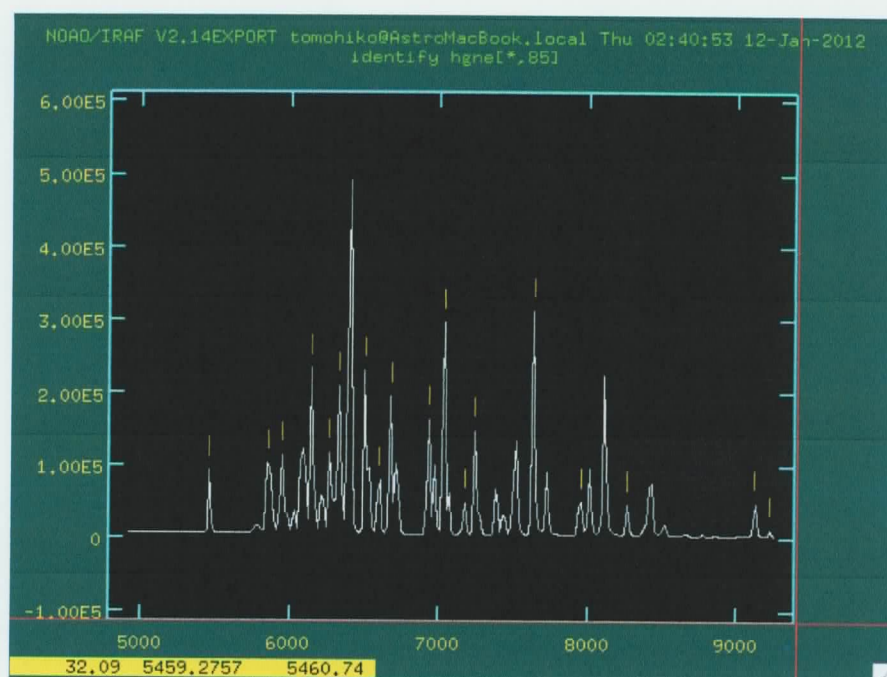


図 3.15.1：波長同定の様子

突出した部分が輝線スペクトルのうえに黄色の線が出ている部分が波長同定した部分。

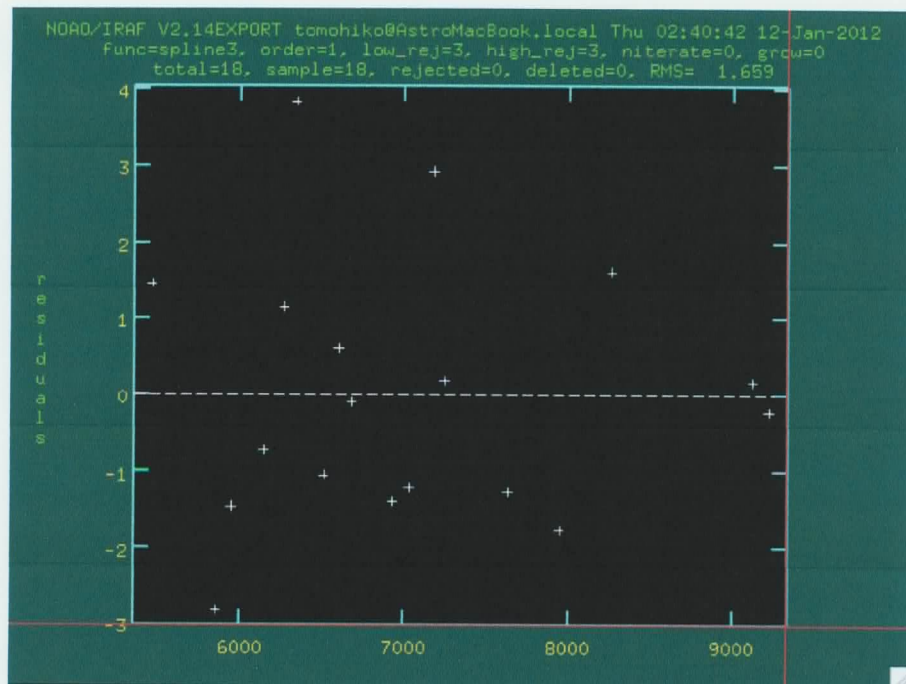


図 3.15.2:関数フィッティングしたグラフ

縦軸は残差で波長同定の正確さを示している。「+」は波長同定した位置で「+」が縦軸の値の0に近いほど正確に波長同定されていることになる。今回は RMS 値も低いので削除した「+」はない。

次の手順に移る。先程“identify”の段階では、空間方向：Y=85 ピクセルに沿った各横軸のピクセルを波長同定したにすぎない。これをすべての空間方向のピクセルごとに横軸：ピクセル（ピクセル番号）を波長に変換してくれるのが、“reidentify”である。

「reidentify 波長同定したファイル名 波長同定したファイル名 verbose+」

とコマンドを入力すると、空間方向のピクセル位置ごとの横軸を波長に変換し、波長同定した結果が表示される。これで“reidentify”により空間方向のピクセル位置ごとに横軸のピクセルと波長の関係を示すファイルが作られた。

次に“fitcoord”タスクで“reidentify”タスクで作成したファイルを波長同定前のコンパリゾンフレームにフィッティングし、CCD の特性で傾いた画像をまっすぐにするためのファイルをつくる。

「fitcoord reidentify で作成したファイル名」

と入力すると図 3.16 グラフが表示される。横軸：ピクセル（ピクセル位置）、縦軸：残差のグラフであり、オブジェクトフレームの輝線がいかにもつすぐに補正されたか示したものである。残差の大きい「+」はうまくまっすぐにならなかったピクセルなのでカーソルをそこまで持っていき“d”→“p”を押すと削除され、“f”で再びフィッティングしてくれる。削除しすぎると補正後の画像が正しく表示されないの、ちょうどよいところでフィッティングを終了する。今回は以下のような結果が得られた。

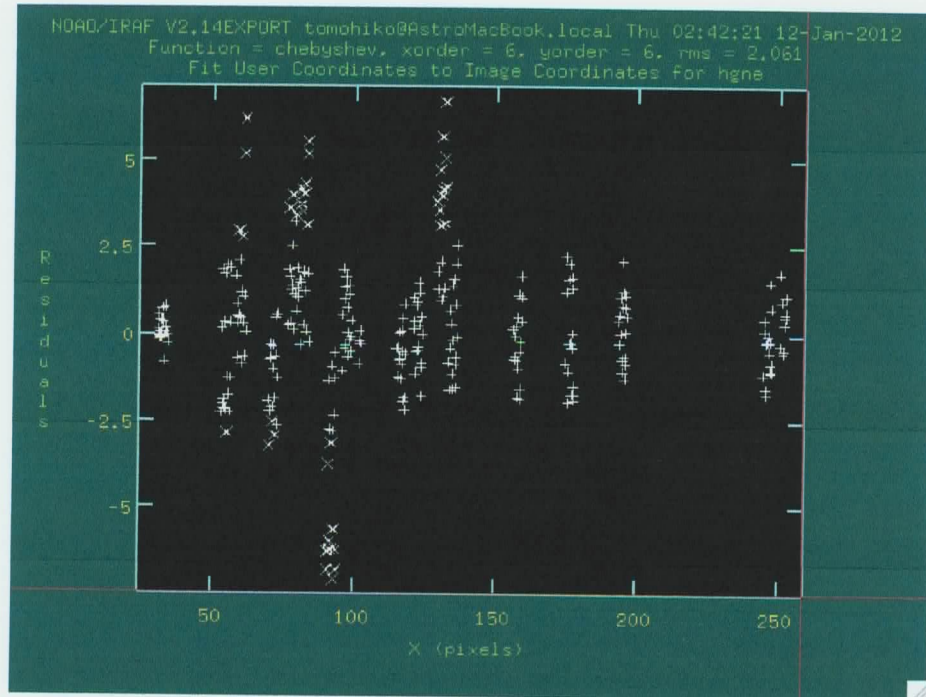


図 3.16 : fitcoord のグラフと結果

今までの作業でオブジェクトフレームを横軸：波長（Å）縦軸：空間方向（ピクセル位置）に変換するファイル、画像の傾きを補正するファイルが作られた。これを、実際にオブジェクトフレームと分光標準星フレームに当てはるのが“transform”タスクである。

「transform 波長較正するファイル名 波長較正後の新しいファイル名 fitcoord で作成したファイル名」

と入力すると画像の傾きが補正される。(図 3.18 a b)

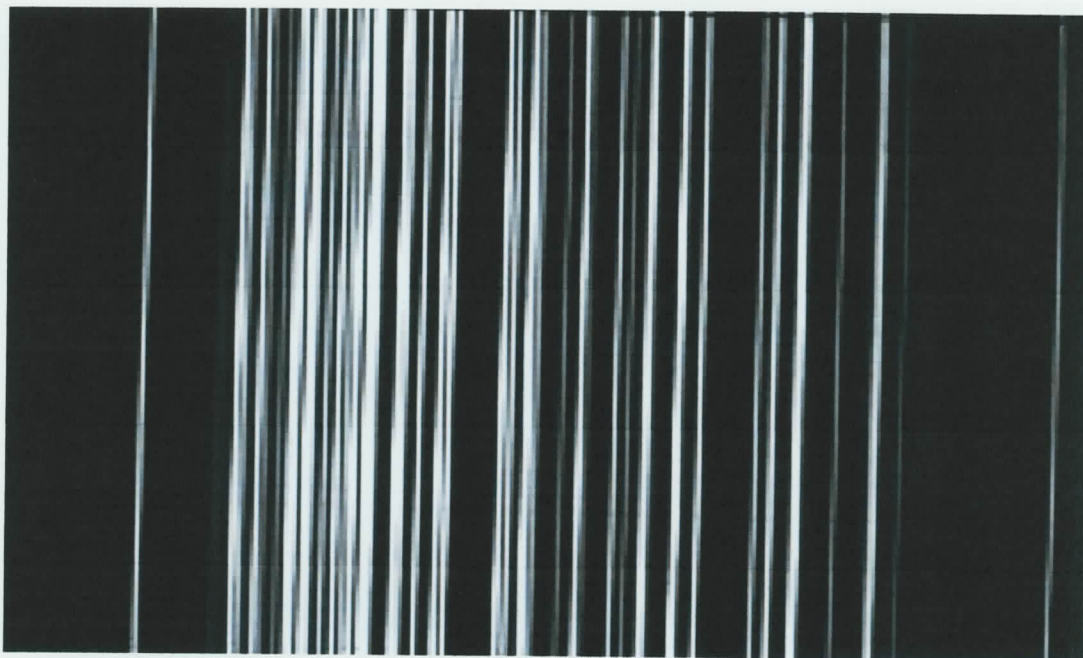


図 3.18a 波長較正前

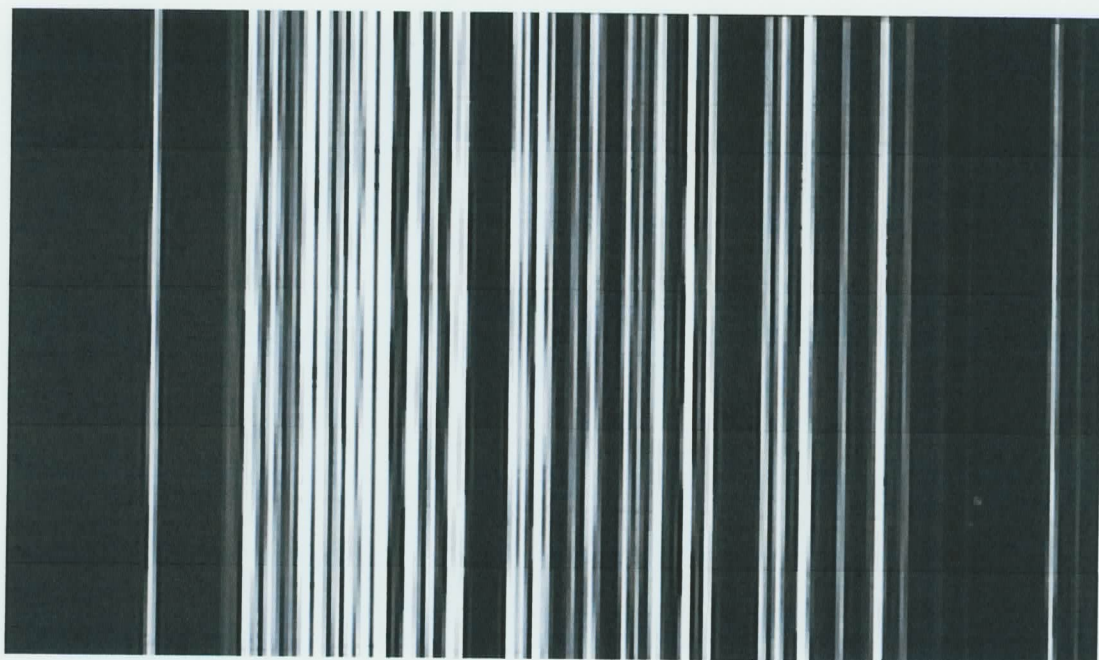


図 3.18b : 波長較正された garradd_df.fit の画像

見比べると線スペクトルの傾きが修正されているのがわかる。波長較正が正確に出来ていない場合、DS9 上には輝線スペクトルがあらゆる方向に歪んだ形になってしまう。波長較正を行なったあとは、DS9 で確認する必要がある。

2.3 一次元化 : apall

本研究ではコマにおける分子種の生成量を求めるのに空間方向の情報は極めて重要であるので、一次元化は行わない。しかし、一次元化すると輝線スペクトルがわかりやすくなりあるので彗星コマの成分を調べる上で重要なタスクである。なので、一応一次元化について説明することとする。

一次処理後のオブジェクトフレームには天体からの光のカウント (S : シグナル) に天体以外からのカウント (N : ノイズ) がのっかっているデータとなっている。オブジェクトフレームの質の良さを決める一つの指針として S と N の関係を示した S/N 比というものがある。S/N 比が大きいものはシグナルが大きいのでデータとしての質が良いとみなせる。S/N 比を大きくするためにある範囲の空間方向を画像から取り出すように指定し、ちょうど天体のスペクトルのみを抽出し、その画像を空間方向に足し合わせることに同時にバックグラウンドを引き S/N 比を大きくすることを一次元化という。一次元化には "twospec, apextract" のパッケージにある "apall" タスクを用いる。一次元化の手順をオブジェクトフレーム `garradd_dfi.fit` を例に示していく。

図 3.19 は `ds9` に表示したオブジェクトフレームの画像である。

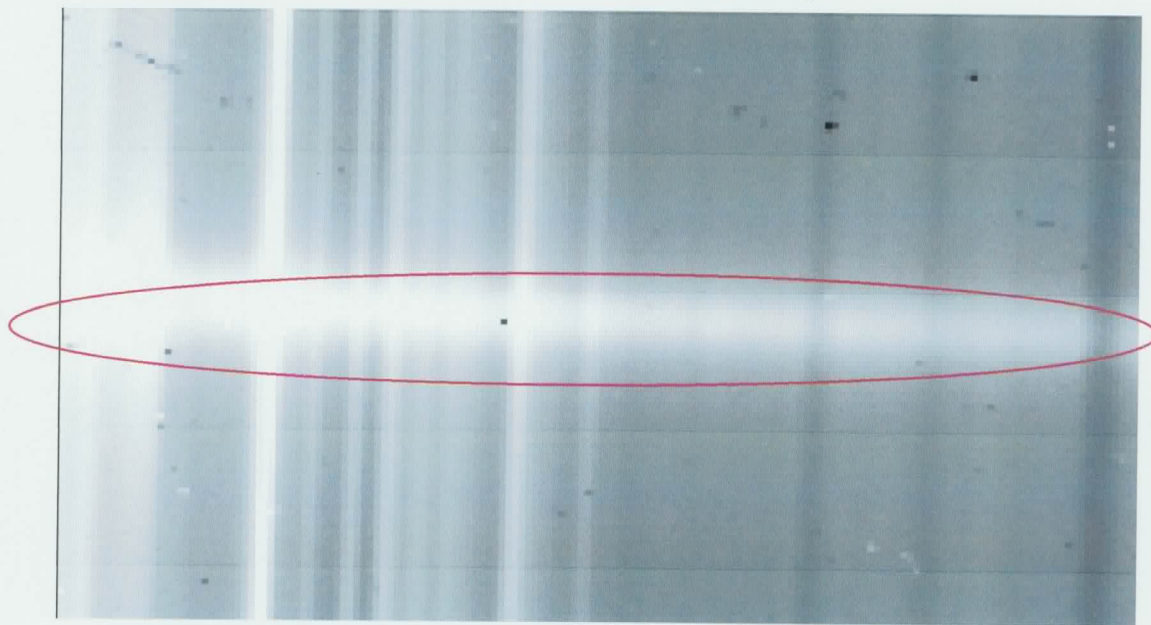


図 3.19 ギャラッド彗星のスペクトル画像

一次元化の際に抽出した部分は天体のスペクトルが映っている部分で赤く○囲みされている部分である。その部分の空間方向への幅の情報を取得し、一次元化のパラメータ設定のヒントとしたい。そのヒントを得るためのタスクが "implot" である。

「implot ファイル名」

で図 3.20 が表示される。図 3.19 はオブジェクトフレームを縦軸 : 85 ピクセルから横軸に沿って切り出した部分のスペクトルの様子である。横軸はピクセル、横軸はカウント値となっている。

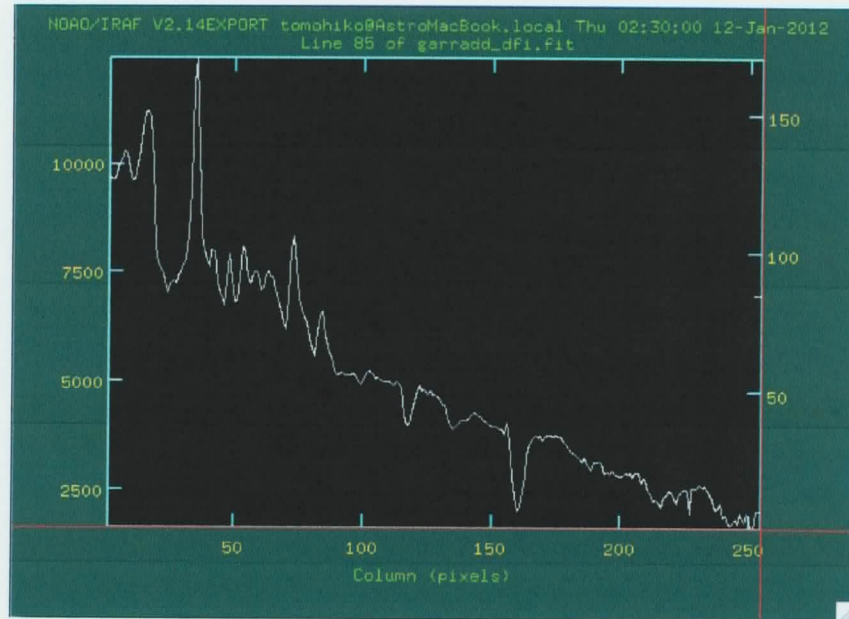


図 3.20 : 横軸に沿って切り出したスペクトル

グラフが右肩下がりにになっているのは彗星ダストの反射光のスペクトルが出ているからである。グラフの左側が短波長側、右側が長波長側である。この連続スペクトルの上に彗星や市街光の輝線スペクトル、地球大気による吸収線、太陽の吸収線がみられる。

画面上で” : c 20 95”と入力すると、図 3.21 のような横軸のある部分を空間方向に切り出したグラフ表示になる。横軸はピクセル、縦軸はカウント数となっている、そして、グラフの形はガウスの正規分布の形となる。それは、スリットの長方向が空間方向なので、天体のカウント数は空間方向に分散しているからである。

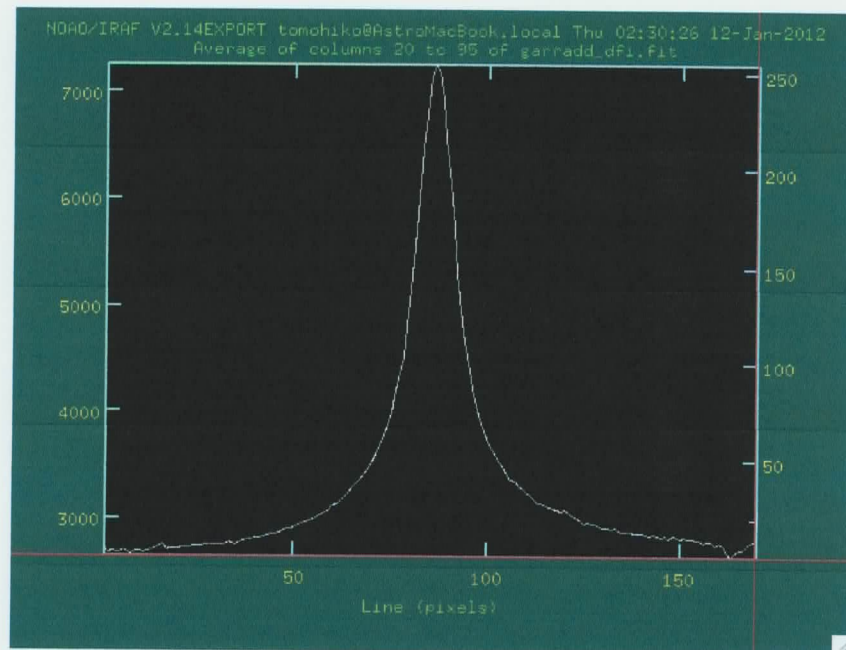


図 3.21：縦軸に沿って切り出したスペクトル

これが、横軸の 20～95pixel を切り出して、その部分を加算平均したグラフ。天体のカウント数 g は空間方向の外側に行くほど小さくなるためにガウスの正規分布のようなスペクトルとなる。

ガウスの正規分布になることを利用し、このグラフの半値幅を知る。今回は-15,15 であった。

ここで得た半値幅の情報を以下の “apall” タスクでのパラメータ設定に用いる。

②apall

“apall”は“implot”で得た情報を用いて、オブジェクトフレームから切り出す画像の範囲を指定し、空間方向（または横軸方向）に足し合わすことができるとともに、オブジェクトフレームにある天体以外からの光を取り除き、S/N比を大きくすることができるタスクである。以下のようにパラメータを設定した。(図 3.22)

図 3.22:apall のパラメータ

input:一次元化するファイル名を入力する
output:一次元化後のファイル名
find:抽出するスペクトルの数。
lower:抽出するスペクトルの領域の下限。
upper:抽出するスペクトル領域の上限。
b_sample:差し引く背景光の範囲。
backgro:背景光を差し引くかどうかを決定。

実行するとグラフが表示される。(図 3.23)

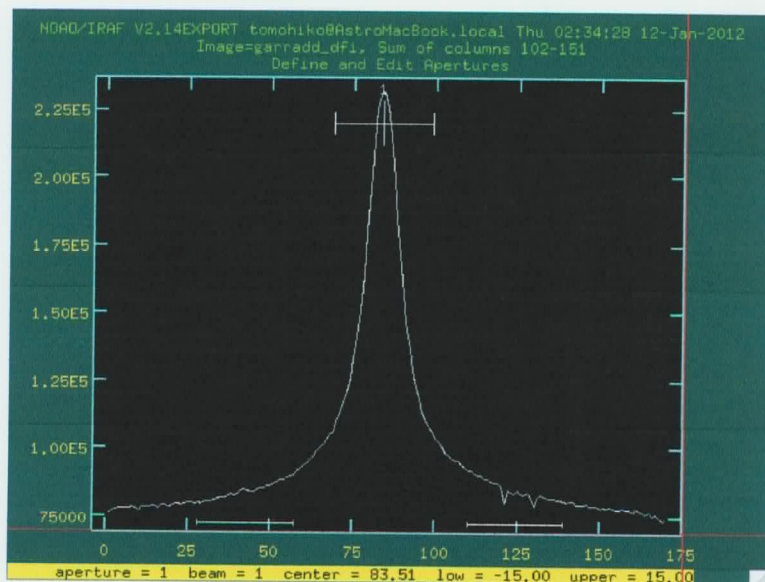


図 3.23:抽出するスペクトルの範囲と差し引くバックグラウンドの範囲
パラメータの設定通り、スペクトルの中心0を基準に下限-15 上限 15
を抽出するようになっている。バックグラウンドは中心0を基準に
-56~-26、26~56 の範囲を指定している。

この図は画像から取り出す範囲とバックグラウンドの範囲を示している。自分が希望する範囲であるならば、画面上で“q”を押す。以下のように指示されるのですべて“yes”として実行キーを押して進む。先に進むと次のようなグラフが表示される。(図 3.24a)

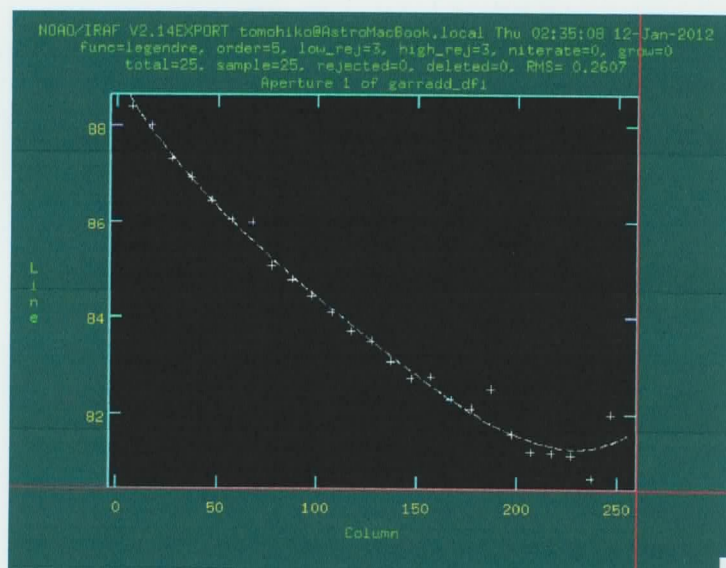


図 3.24a: スペクトルの S/N 比の関数フィッティング
点線からずれている「+」は S/N 比が小さい横軸の座標を示している

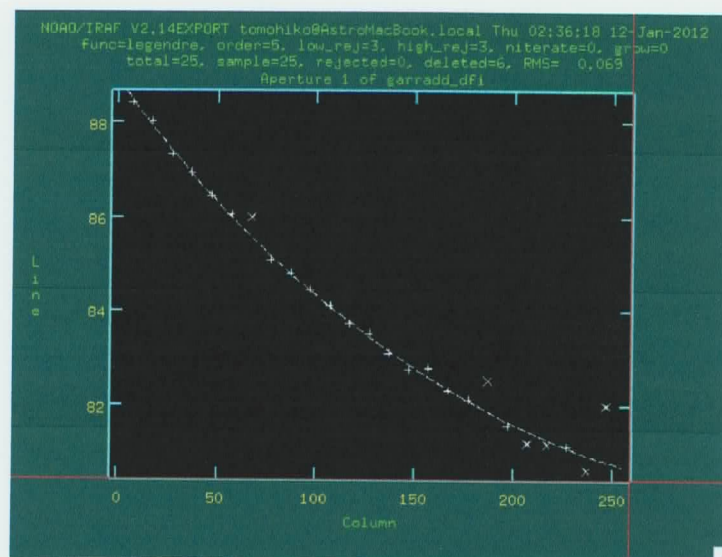


図 3.24b: S/N 比の小さい「+」を削除し、再フィッティングした結果

この図は 픽셀ごとの S/N の大きさを示している。点線からずれている「+」は S/N 比が小さいので“d”で削除する。“f”で再びフィッティングして、RMS が小さくなるように

調節していく。(図 3.24b)調節が終わったら、S/N 比の図から“q”で戻りもう一回“q”を押して指示されたことを全て“yes”で実行キーを押しければ、一次元化の結果が表示され、ファイルがディレクトリに保存される。(図 3.25)

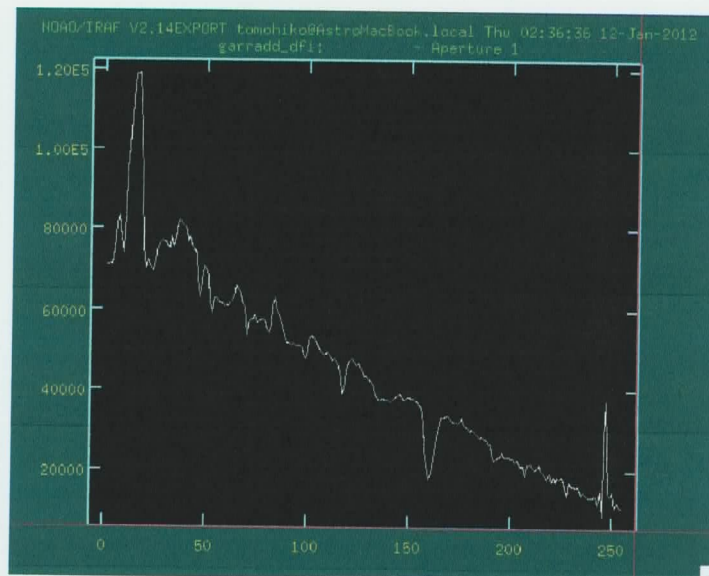


図 3.25 : garradd_dfi.fit 一次元化の結果
S/N 比が大きくなり、彗星ガスの輝線スペクトルが
顕著に現れるようになった。

以上分光標準星フレームも同じ手順で一次元化を行っていく。

2.4 波長感度補正

CCD の感度は波長によって感度に特性がある。この波長感度特性は分光標準星フレームを用いて補正することができる。分光標準星とは波長ごとの放射強度が正確にわかっている恒星のことである。観測した分光標準星フレームを予めわかっている分光標準星のデータで割り算することで波長ごとの感度が求まる。波長を横軸にとって示した感度のグラフを「分光感度曲線」という。これを彗星のオブジェクトフレームに掛け算すると本当の彗星の光強度を知ることができる。ただし、観測の際の積分時間が彗星と分光標準星で異なっている場合はその分を補正しないといけないので、得られる CCD カウントは、積分時間に比例するので分光標準星のカウントを（彗星の積分時間/分光標準星の積分時間）倍する必要がある。

さらに、ここで波長ごとの大気による減光の特性を考慮しなければならない。天体からくる光は大気量 (AIRMASS) に対する減光の度合いが波長毎に異なるためである。ターゲットと分光標準星を同じ水平高度で観測できる場合は問題ない。それは、ターゲットと分光標準星からの光が同じ AIRMASS の大気を通過してきているのでターゲットを観測した際の AIRMASS による波長毎の減光を分光標準星で再現できているからである。しかし、今回はターゲットの軌道や観測時期の影響もあり同じ水平高度で観測出来ないため、別の形で

ターゲットを観測した高度における大気減光の様子を再現しなければならない。

そこで、異なる高度で何度も分光標準星を観測し、それぞれに分光感度を求め、これらの異なる高度に置ける分光感度曲線をつかって、ターゲットを観測した高度における分光感度曲線を推定することにした。

波長感度補正は以下の手順で行なっていく。

①AIRMASS の登録

まず、先ほど波長較正したオブジェクトフレームと分光標準星フレームの AIRMASS をそれぞれのヘッダファイルに登録する。

```
hedit garradd_adfi.fit AIRMASS 1.45 add+ update+
```

と入力するとそれぞれのヘッダファイルに AIRMASS が登録される。

②対応関係データの作成

”standard”タスクは観測で取得した分光標準星のスペクトルと IRAF に登録されている分光標準星のスペクトルを比較して、波長ごとに本来のフラックスと観測カウントとの対応関係を作るものである。


```

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

input =           hr4963_afi Input image file root name
output =           stand Output flux file (used by SENSFUNC)
(samesta=           yes) Same star in all apertures?
(beam_sw=           no) Beam switch spectra?
(apertur=           ) Aperture selection list
(bandwid=           INDEF) Bandpass widths
(bandsep=           INDEF) Bandpass separation
(fnuzero= 3.6800000000000E-20) Absolute flux zero point
(extinct=           ) Extinction file
(caldir = onedstds$spec16cal/) Directory containing calibration data
(observ=           )_.observatory) Observatory for data
(interac=           yes) Graphic interaction to define new bandpasses
(graphic=           stdgraph) Graphics output device
(cursor =           ) Graphics cursor input
star_nam=           hr4963 Star name in calibration list
airmass =           2.057 Airmass
exptime =           30. Exposure time (seconds)
mag =           4.38 Magnitude of star
magband =           V Magnitude type
teff =           Effective temperature or spectral type
answer =           n (no|yes|NO|YES|NO|YES|)
(mode =           ql)

```

ESC-Q for HELP

図 3.26 : standard のパラメータ例

設定が必要な項目は“input : 入力するファイル名”“output : 出力するファイル名”
 “star_nam : 分光標準星の名称”“airmass : 大気量”“exptime : 露出時間”“mag : 等級”
 “magband : 等級バンド”“answer : グラフを表示の有無”である。

観測時のログ(観測時刻、露出時間、大気量を記録したもの)を参考に設定を観測した分光標準星に合わせてパラメータの設定を変更していく。(output の項目だけはすべて同じにする。)

output のファイル名を変えずに standard タスクで作成したすべての分光標準星フレームの対応関係データは stand というファイルにひとまとまりにされている。これで、大気量や露出時間によって異なる波長感度を補正するためのファイルが作成されたこととなる。

②波長感度曲線を作成する

“standard”で作られた対応関係のデータ(図 3.26 のパラメータでいうと stand と名付けたファイルのこと)をもとに波長ごとの感度の関数ファイルをつくる。これを波長感度曲線といい、この波長感度曲線でオブジェクトフレームを割ると冷却 CCD の波長感度特性に

よるスペクトルの影響を補正することができる。パラメータは以下のように設定した。

```

                                IRAF
Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = longslit
TASK = sensfunc

standard=      stand  Input standard star data file (from STANDARD)
sensitive=     sensfunc Output root sensitivity function imagename
(apertur=      )      Aperture selection list
(ignorea=      yes)    Ignore apertures and make one sensitivity func
(logfile=      logfile) Output log for statistics information
(extinct=      )      Extinction file
(newexti=      extinct.dat) Output revised extinction file
(observa=      )_..observatory) Observatory of data
(function=     spline3) Fitting function
(order =      6)      Order of fit
(interac=      yes)    Determine sensitivity function interactively?
(graphs =      srea)   Graphs per frame
(marks =      plus cross box) Data mark types (marks deleted added)
(colors =      2 1 3 4) Colors (lines marks deleted added)
(cursor =      )      Graphics cursor input
(device =      stdgraph) Graphics output device
(answer =      yes)    (no=yes|NO|YES)
(mode =      ql)

```

:90

図 3.27 : sensfunc のパラメータ

standard:standard タスクで作成したファイル名

sensitive:作成する波長感度曲線のファイル名を入力

実行すると次のグラフが表示される。

sensfunction を実行するとまず図 3.28a が表示される。

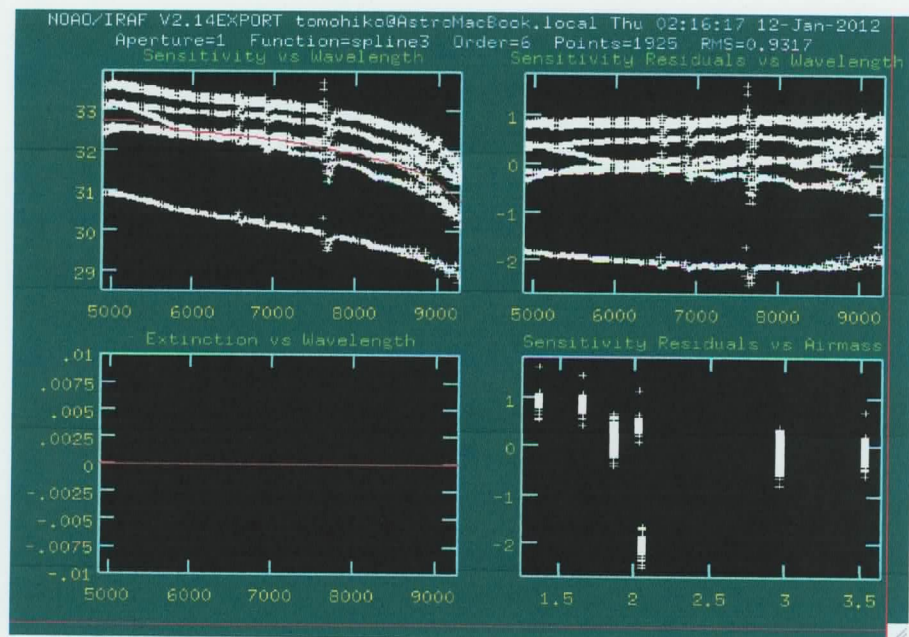


図 3.28a:sensfunction を実行した時に表示されるグラフ
 左上のグラフ：実際のバンドパス毎の感度とその関数フィッティング
 右上のグラフ：左上のフィッティングに対する残差
 右下：波長毎の大気減光の影響を示したもの
 左下：波長感度曲線（まだ求められていない）

次に"s"キーを押すとそれぞれの分好標準星フレームから求められた波長感度曲線の平均値を取ることができる。赤い線が今回求められた波長感度曲線で、赤い線から飛び出た「+」は分光標準星を分光した際に出る吸収線の影響で波長感度が正確でない部分であるので"d"キーを押したあとに"w"キーを押すと削除できる。削除した結果が図 3.28b である。

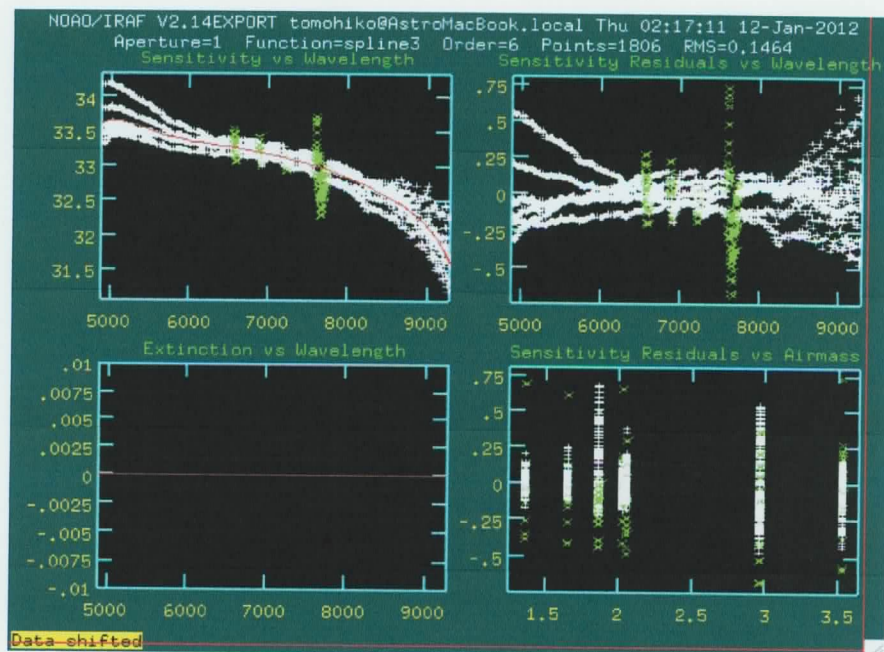


図 3.28b : 吸収線を削除したあとの波長感度曲線
次に”e”を押すと

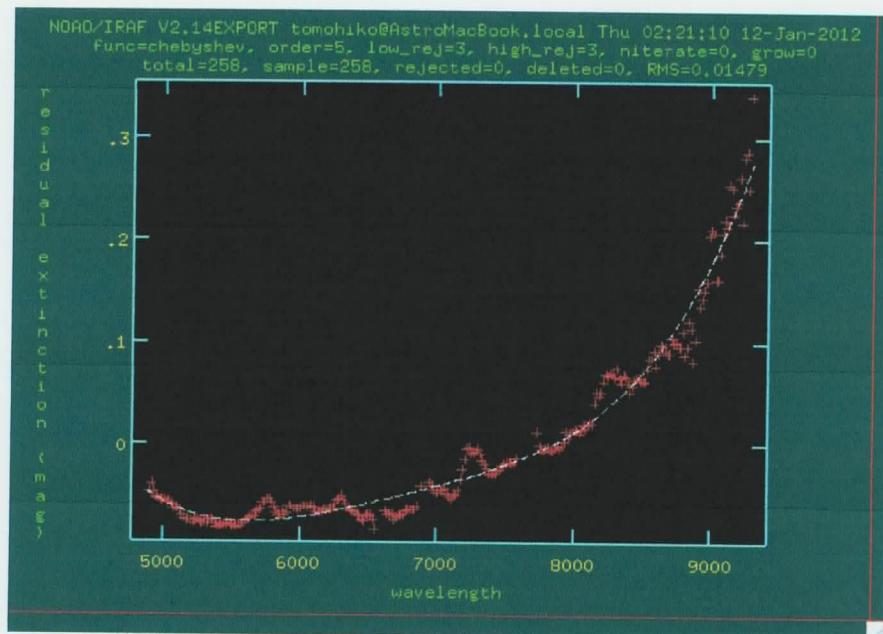


図 3.28c :

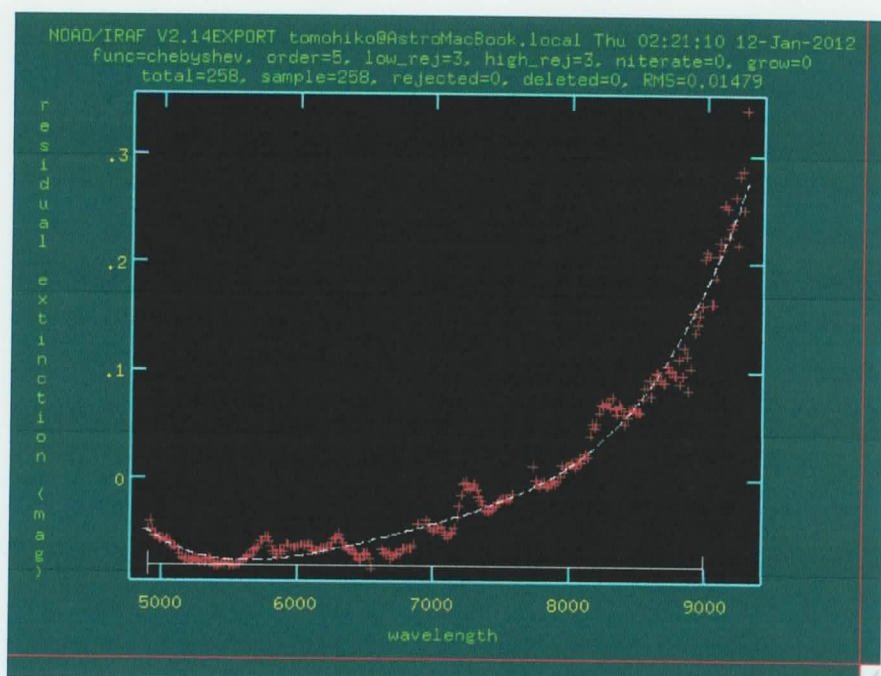


図 3.28d : 関数フィッティングした様子

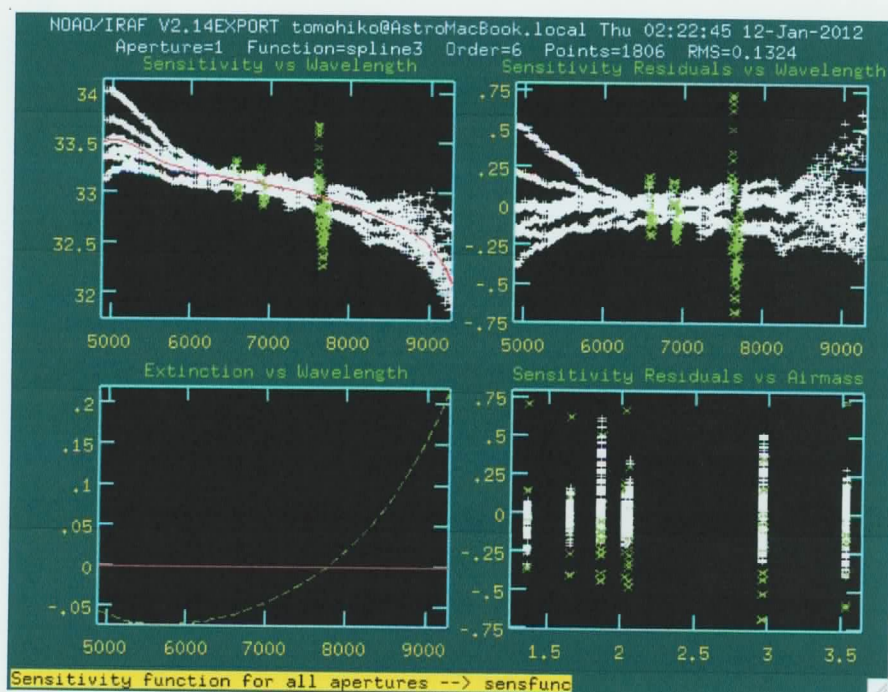


図 3.30 : sensfunc の結果

左下のグラフが感度波長曲線である。

③波長感度を補正する:calibrate

①と②で作った波長感度特性のデータでオブジェクトフレームを実際に割ってあげるのが“calibrate”である。パラメータは以下の用に設定した。

```

                                IRAF
Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = longslit
TASK = calibrate

input =      garradd_adfi  Input spectra to calibrate
output =     garradd       Output calibrated spectra
(extinct=   yes) Apply extinction correction?
(flux =     yes) Apply flux calibration?
(extinct=   yes)      extinct.dat) Extinction file
(observ=    )_.observatory) Observatory of observation
(ignorea=   yes) Ignore aperture numbers in flux calibration?
(sensiti=   sensfunc) Image root name for sensitivity spectra
(fnu =     no) Create spectra having units of FNU?
(mode =    ql)

:go
```

図 3.31 : calibrate のパラメータ

input:波長感度補正するファイル名

output:波長感度補正後のファイル名

実行すると波長感度補正されたオブジェクトフレームのスペクトルのグラフが表示される。

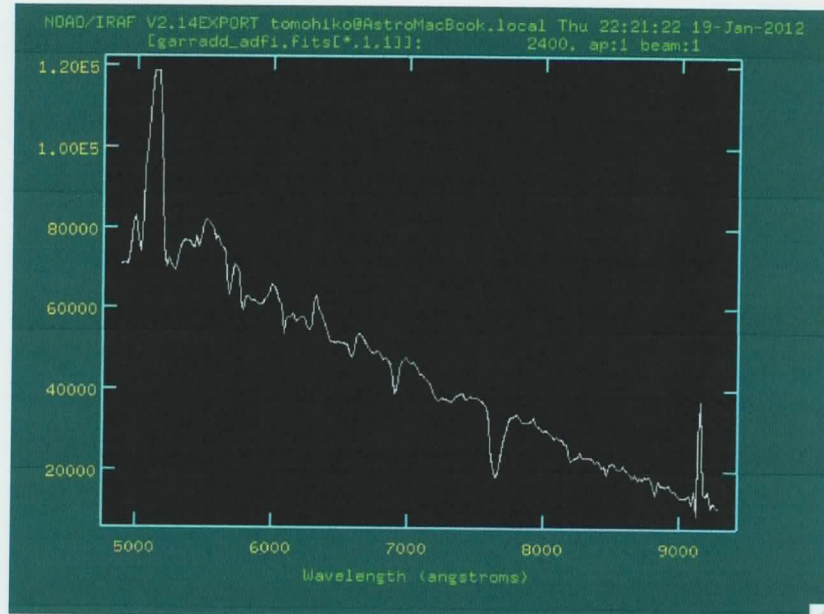


図 3.32a:波長感度補正前 garradd_adfi.fit

波長感度補正前だと短波長側の放射強度が長波長側に比べ小さいことがわかる。これは CCD チップの短波

長側の光(電磁波)に対して感度が低いためである。

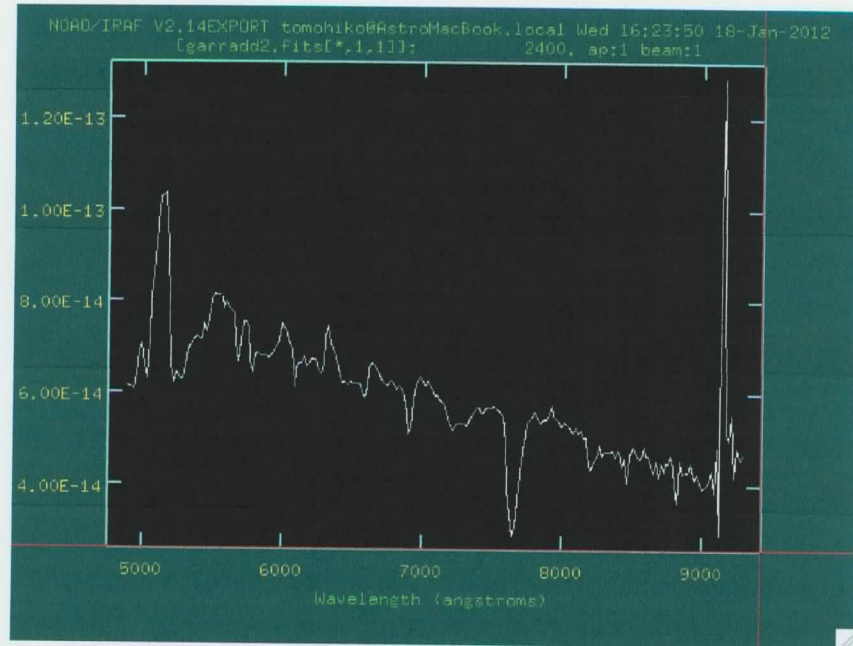


図 3.32 : 波長感度補正後 garradd.fit
9000Å 付近に輝線スペクトルが顕著に現れたことが伺える。

3.3 解析結果

図 3.33 が今回解析した C/2009P1(Garradd)彗星のスペクトルからわかった彗星コマ成分である。

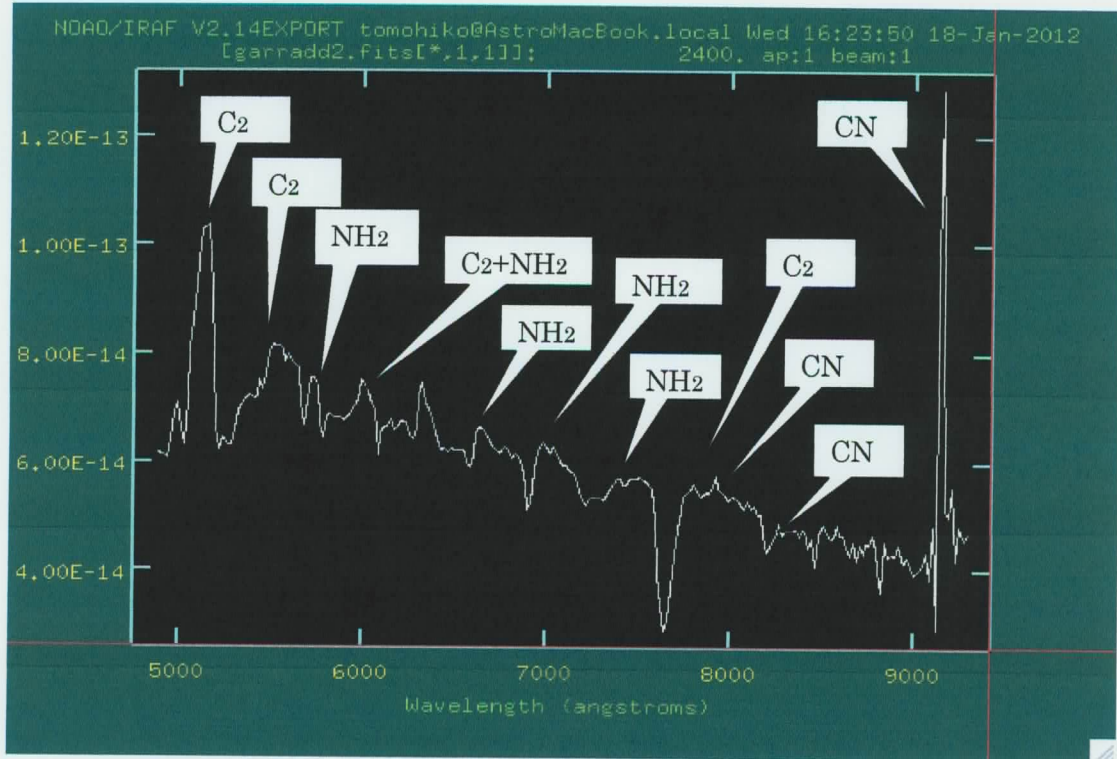


図 3.33

本研究で観測した C/2009P1(Garradd)彗星から得られたスペクトル

4939 ~ 5205Å	C2
5282 ~ 5665Å	C2
5694 ~ 5711Å	NH2
5924 ~ 6066Å	C2+NH2
6278 ~ 6396Å	NH2
6603 ~ 6679Å	NH2
6951 ~ 7015Å	NH2
7316 ~ 7405Å	NH2
7770 ~ 7817Å	C2
7895 ~ 7890Å	CN
8255 ~ 8286Å	CN
9120 ~ 9170Å	CN

図 3.34

輝線スペクトルの波長から同定した C/2009P1(Garradd)彗星に含まれる分子種

IV. 考察

1. 本研究で観測した C/2009 P1 (Garradd) 彗星のコマについて

本研究で観測した C/2009 P1 (Garradd) 彗星のコマに C_2 、 NH_2 、 CN が含まれていることがわかった。これらは一般に彗星で観測される分子種である。(Jacques Crovisier、Therese Encrenaz (2000 年))

彗星のコマは彗星核から昇華したガスを主体とした“ガスリッチ”なものと彗星核から放出された塵を主体とした“ダストリッチ”なものとの大きく分け 2 種類のコマの構成成分が挙げられる。ガスリッチな彗星のコマは昇華ガスの輝線で明るく輝いているため、分光すると輝線スペクトルの放射強度が大きい起伏の激しいスペクトルとなる。一方、ダストリッチな彗星のコマは彗星核から放出されたダストによる太陽光の散乱成分で明るく輝いているため、分光すると太陽光の散乱成分である連続スペクトルの放射強度が大きく、輝線スペクトルが連続光成分に埋もれたスペクトルとなる。

ぐんま天文台で観測された C/2001 A1 (LINEAR) 彗星では、太陽光の散乱成分である連続スペクトルの放射強度が小さく、彗星のコマに含まれるガス成分の輝線スペクトルの放射強度が大きい。(図 4.2) これは彗星コマに含まれるガス/ダスト比において、ガスの比率が大きいためである。

同じく、ぐんま天文台で観測された C/1999 T1 (McNaught-Hartley) 彗星は C/2001 A1 (LINEAR) 彗星と違い連続スペクトルの放射強度が大きい。これは、C/1999 T1 (McNaught-Hartley) の彗星コマに含まれるガス/ダストの比においてガスの比率が小さいためである。

本研究で観測した C/2009 P1 (Garradd) 彗星とぐんま天文台で観測された 2 つの彗星を比較すると、は、ぐんま天文台で観測された 2 つの彗星よりガスの比率が小さい。このため、C/2009 P1 (Garradd) 彗星のコマは比較的ダストリッチである。

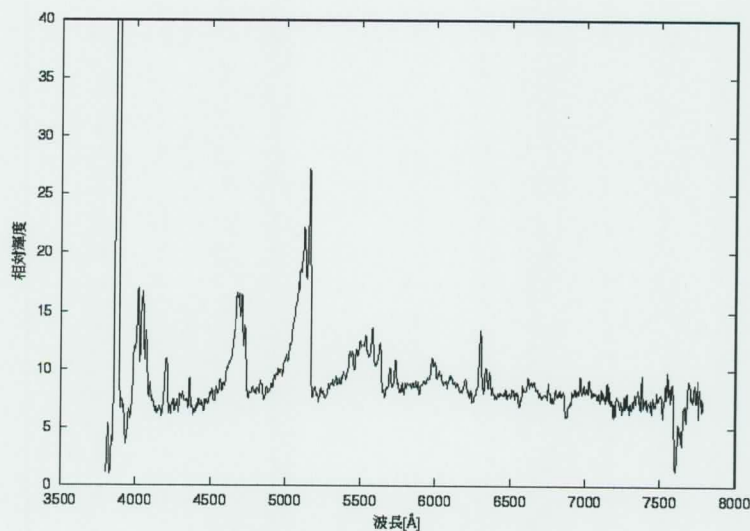


図 4.1 : C/1999T1(McNaught - Hartley)

県立ぐんま天文台で観測したリニア彗星のスペクトル

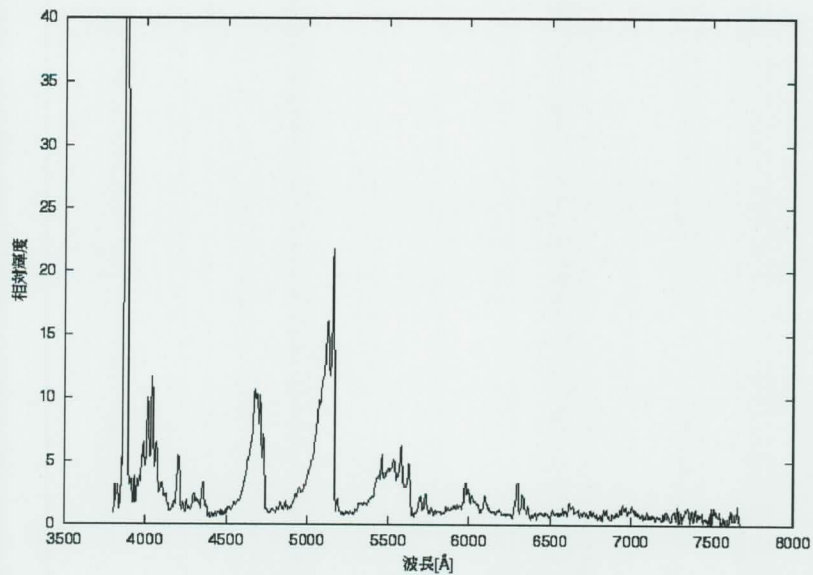


図 4.2C/2001A1(LINEAR)

観測に用いた分光器は C/1999 T1(McNaught - Hartley)と同様のもの
(提供:県立ぐんま天文台)

※県立ぐんま天文台の分光器の仕様は以下である。

- ・ 望遠鏡 : $D=65\text{cm}$, $f=7800\text{mm}$, $F=12$, カセグレン
- ・ 名称 : 小型分光器(GCS)
- ・ コリメータ : $f=240\text{mm}$
- ・ カメラレンズ: $f=200\text{mm}$
- ・ 分散素子: 平面回折格子(300gr./mm , 1200gr./mm)

(提供:県立ぐんま天文台)

2. 彗星核に含まれる成分について

本研究で観測された C2009 P1 (Garradd) には C_2 、 NH_2 、 CN ラジカルが見つかった。これらの分子種はラジカルと呼ばれる。ラジカルとは不対電子をもったものである。ラジカルは化学的に不安定であるので、自然環境で普通は単体で存在することはない。つまり、彗星の核に C_2 、 NH_2 、 CN ラジカルが最初から存在していたわけではなく、他の安定分子の形で取り込まれたはずである。

C_2 、 NH_2 、 CN ラジカルが生成される原理を、 H_2O を具体例にして示す。彗星核を作る氷成分の 8 割が H_2O の氷であると言われており、その H_2O (氷) は彗星が太陽に近づくと彗星の表面温度が上昇し、彗星核の氷成分が昇華する。昇華した H_2O 分子は直接太陽光からの紫外線を浴びてしまう。(彗星には地球大気のような大気がないので) このため、分子が持つ原子同士の結合エネルギーより大きい光エネルギーを吸収するので、結合が切れてしまう。このような過程を「光解離」という。このように、彗星核から昇華した分子種が光解離することにより不安定なラジカルである C_2 、 NH_2 、 CN が生成される。

光解離の様子を H_2O 分子の例で示す。(W.F.HUEBNER_1991)

- $H_2O + h\nu \rightarrow H + OH$
- $H_2O + h\nu \rightarrow H_2 + O$
- $H_2O + h\nu \rightarrow H + H + O$
- $H_2O + h\nu \rightarrow H_2O^+ + e$
- $H_2O + h\nu \rightarrow H + OH^+ + e$
- $H_2O + h\nu \rightarrow H_2 + O^+ + e$
- $H_2O + h\nu \rightarrow OH + H^+ + e$

H_2O 分子が紫外線($h\nu$)と反応し光解離すると上記の反応式のように、ラジカル(OH)の他に分子(H_2)、原子(H 、 O)も生じる。さらに、エネルギーの高い(波長の短い)電磁波を受けるとイオン(H^+ 、 OH^+ 、 H_2O^+)も生じることもある。分子種からイオンが生じるのはエネルギーの高い光エネルギーが原子核を取り囲んでいる電子を軌道上からたたき出してしまうからである。これを「光電離」という。「光電離」では分子種からマイナス電荷を帯びた電子を放出するためプラス電荷を帯びたイオンを生成する。

H_2O 分子は彗星核の構成成分である。このように彗星核の構成成分である分子を親分子(parent molecules)といい、親分子は比較的安定な状態である分子である。また、その親分子が太陽光の紫外線と反応して生成されたラジカル、原子、分子、イオンを娘分子(daughter molecules)という。本研究で観測できた C_2 、 NH_2 、 CN ラジカルは娘分子に分類される。

娘分子は親分子が光解離によって生成するので、娘分子がどの親分子から光解離により生成されたかを考察することで彗星核の組成を推定することができる。

本研究では観測した C/2009 P1 (Garradd) 彗星の核の成分を、 C_2 、 NH_2 、 CN ラジカルを生成すると考えられる親分子の光解離過程を考察し、推定することとした。

3. C/2009P1(Garradd)彗星の推定

今まで彗星の観測により発見されている親分子を以下に示す。(Jacques Crovisier, Therese Encrenaz(2000 年))

親分子:Parent molecules	観測された波長領域 UV=紫外線観測, Radio=電波観測 IR=赤外線観測
H ₂ O(水)	IR
CO(一酸化炭素)	UV, Radio, IR
CO ₂ (二酸化炭素)	IR
CH ₄ (メタン)	IR
C ₂ H ₆ (エタン)	IR
C ₂ H ₂ (アセチレン)	IR
H ₂ CO(ホルムアルデヒド)	Radio
CH ₃ OH(メタノール)	Radio
HCOOH(ギ酸)	Radio
HNCO(イソシアニン酸)	Radio
NH ₂ CHO(ホルムアミド)	Radio
CH ₃ CHO(アセトアルデヒド)	Radio
HCOOCH ₃ (ギ酸メチル)	Radio
NH ₃ (アンモニア)	Radio, IR
HCN(シアン化水素)	Radio, IR
HNC(イソシアン化水素)	Radio
CH ₃ CN(メチルシアニド)	Radio
HC ₃ N(シアノアセチレン)	Radio
N ₂ (窒素)	Visible
H ₂ S(硫化水素)	Radio
H ₂ CS(チオホルムアルデヒド)	Radio
CS ₂ (二硫化炭素)	UV, Radio
OCS ₂ (硫化カルボニル)	Radio, IR
SO ₂ (二酸化硫黄)	Radio
S ₂ (硫黄分子)	UV

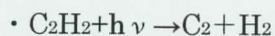
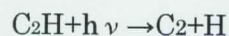
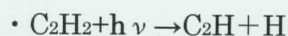
以上の親分子と W.F.HUEBNER による分子種の光解離の反応式(W.F.HUEBNER 1991)をもとに、C/2009 P1 (Garradd)彗星の核の成分を考察する。

(1)C₂ ラジカルの親分子

C₂ ラジカルは炭素鎖を持つ分子が親分子であると考えられる。(Jacques rovisier, Therese Encrenaz (2000))。

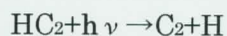
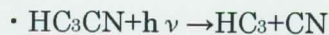
彗星から発見された炭素同士の結合を持つ分子は C₂H₂、C₂H₆、HC₃CN である。

まず、C₂H₂ の光解離は以下の反応式となる。



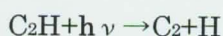
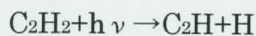
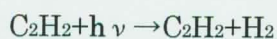
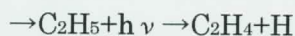
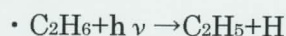
C₂H₂ 親分子から生じるとすれば C₂ ラジカルは C₂H₂ 第 1 世代娘分子か第 2 世代娘分子と考えられる。

次に、HC₃CN は以下の反応式となる。

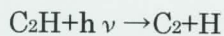
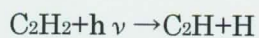
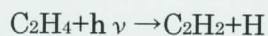
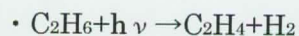
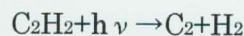


HC₃CN 親分子から生じるとすれば C₂ ラジカルは第 2 世代娘分子であると考えられる。

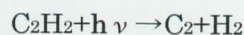
最後に C₂H₆ の光解離は以下の反応式となる。



または



または

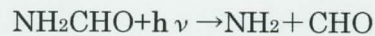


C₂H₆ 親分子から生じるとすれば C₂ ラジカルは第 2 世代娘分子または第 3 世代娘分子、第

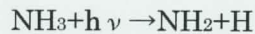
4 世代娘分子、第 5 世代娘分子であると考えられる。

(2)NH₂ ラジカルの親分子

NH₂ ラジカルはアンモニアとアミノ基を持つ分子が親分子であると考えられる。このことから、上記の表より NH₃、NH₂CHO が親分子であると考えられる。NH₂CHO はアミノ基とアルデヒド基の結合から解離するので、以下の反応式となる。



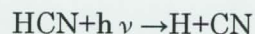
NH₂CHO は一段階の光解離で NH₂ ラジカルを生じる。NH₃ は N-H の結合のみであるので、以下の反応式となる。



NH₃ は一段階の光解離で NH₂ ラジカルを生じる。

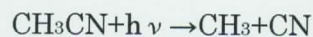
(3)CN ラジカルの親分子

CN ラジカルはシアン化物を持つ親分子である。このことから上記の表より HCN、CH₃CN、HC₃N が親分子であると考えられる。HCN は C-H 結合から解離するので、以下の反応式となる。



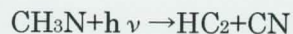
HCN は一段階の光解離をし、CN を生じる。

CH₃CN は C-C 結合から解離するので、以下の反応式となる。



CH₃CN は一段階の光解離をし、CN を生じる。

HC₃N は C-C 結合から解離するので、以下の反応式となる。



HC₃N は一段階の光解離をし、CN を生じる。

3. まとめ

- ・本研究で観測した C/2009P1(Garradd)彗星はダストによる太陽光の散乱成分である連続スペクトルの放射強度とぐんま天文台で観測した C/1999T1(McNaught - Hartley)彗星、C/2001A1(LINEAR)彗星を比較すると C/2009 P1 (Garradd)彗星は両者の彗星よりダストが多い彗星であった。よって C/2009 P1(Garradd)彗星はダストリッチコマである。
- ・ C/2009P1(Garradd)彗星から観測されたラジカルのそれぞれの親分子は、C₂ ラジカルでは C₂H₂、C₂H₆、HC₃CN、NH₂ ラジカルは NH₃、NH₂CHO、CN は HCN、CH₃CN、CH₃N であると考えられる。本研究で観測した C/2009P1(Garradd)彗星の核の氷組成はこれらの親分子が含まれていると考えられる。

V. 参考文献

・「彗星－彗星科学の最前線」

著者 中村士・山本哲生

発行元 恒星社厚生閣

1984年11月5日

・「宇宙の観測Ⅰ－光・赤外天文学－」

著者 家 正則・岩室 史英・舞原 俊憲・水本 好彦・吉田 道利

発行元 日本評論社

2007年7月20日

・「COMET SIENCE」

著者 Roger Maurice Bonnet

発行元 CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS

2000年

・「理科年表－国立天文台編－」

発行元 丸善株式会社

2005年

本研究を行うにあたって、本校地学研究天文学ゼミの関口朋彦准教授には研究内容における議論・資料・解析機器の提供などすべての面でご指導いただいた。

なよろ市立天文台きたすばるの方々には宿舎の提供、観測機器の操作方法や研究内容に関する情報の提供など多岐にわたりサポートしていただいた。

北海道大学大学院理学院特任助教授の渡辺誠さんには長期間の間 1.6m 望遠鏡を使用させていただいたのと同時に、1.6m 望遠鏡の使用方法など熱心なご指導を

VI. 謝辞

京都産業大学河北秀世教授にはお忙しい中、メールやスカイプ、実際に旭川に出張に来ていただいて、IRAF の使用方法、分光観測手法の指導、解析データに関する助言・指導などをしていただいた。

以上の方々には本当にご心配とご迷惑をかけたこととお詫びすると同時に、このような研究成果を出せたことに非常に感謝する。