修士論文

近赤外線多天体分光装置の 冷却マルチスリット交換機構の開発

平成12年(2000年)

東北大学大学院理学研究科天文学専攻

東谷 千比呂

Abstract

近年、8-10m級の大型光赤外望遠鏡が次々と完成し、日本もハワイ島マウナケア山頂に口径 8.2mの「すばる望遠鏡」を建設した。すばるは、期待されていた高い駆動と結像精度を実証し、 今後の様々な観測が期待されている。

すばる望遠鏡の大口径による集光力と、カセグレン焦点面が持つ視野 6 という広視野を 最大限活かす装置の一つとして、現在、私たちのグループでは、近赤外多天体撮像分光装置 (MOIRCS)の開発をすすめている。近赤外波長帯のKバンドまでを、大フォーマットの赤外 アレイを用いて、広視野かつ高空間分解能を実現し、冷却したスリットマスクで多天体分光で きる装置はまだ例を見ない。この MOIRCS を用いて、z>3~4の銀河の分光観測を行い、初期 宇宙の銀河形成史について統計的研究をすすめる。

遠方銀河からのかすかな光を捉えて分光するには、光量のロスが最も少ない冷却したマルチ スリットでの多天体分光がどうしても必要である。一般的に赤外線観測装置は、熱輻射による ノイズ効果をできる限り取り除くために、装置全体を真空・冷却する。この条件下で、精度の 要求される機構を駆動制御するには手間と工夫を要する。

私は、MOIRCSの目玉機能の一つである、冷却マルチスリット交換機構の開発を主に担当してきた。これまでに、冷却マルチスリット実現のための多くの課題について、特にマスクの冷却すべき温度の見積もり、材質の選定、スリットの加工方法の詳細な検討を行い、その結果をもとにマスクを冷却したまま焦点面への設置・交換する方法について基本設計を行った。本論文ではその詳細について述べる。

MOIRCS は製作・実験の段階に入り、2003 年初頭のファーストライトを予定している。

0 序論

1 MOIRCSによる近赤外線観測	2
1-1 z>3の遠方銀河の星生成史	2
1-1-1 赤方偏移した輝線の検出から求める星生成率	2
1-1-2 観測の実現性	4
1-2 遠方銀河団の近赤外分光サーベイ	6
2 MOIRCSの概要	7
2-1 装置の概要	7
2-2 光学系	8
2-3 検出器	10
2-4 冷却マルチスリットによるMOS機構	11
2-5 真空冷却デュワー	11
2-6 限界等級	12
2-6-1 撮像	13
2-6-2 分光	14
2-7 MOIRCSのライバル装置(世界の近赤外多天体分光器の現状)	15
2-8 主な仕様のまとめ	17
3 冷却マルチスリット交換機構の設計	18
3-1 多天体分光の方法	18
3-2 スリットマスク交換機構	20
3-2-1 マスクストッカ	21
3-2-2 マスクチェンジャ	22
3-2-3 マスクホルダ	23
3-3 スリットマスクの基本仕様	25
3-4 スリットマスクの温度	25

1

3-4-1 スカイからの輻射 3-4-2 スリットマスクからの熱輻射 3-4-3 望遠鏡からの輻射 3-4-4 装置から検出器へ入る熱輻射 3-4-5 冷却温度のムラとふらつき	26 27 28 29 30
3-5 スリットマスクの材質	31
3-6 スリット位置の決定	32
3-7 スリットの加工	33
4 解析と実験	35
4-1 スリットマスクの冷却解析(数値実験)	35
4-1-1 有限安系法 4-1-2 冷却時間の見積もり(非定常熱伝導解析)	35
4-1-3 冷却による変形量の見積もり(静弾性熱応力解析)	38
4-1-4 冷却解析のまとめ	42
4-2 スリットマスクの冷却実験	42
4-3 スリットマスク交換機構の駆動実験	43
5 まとめと今後の展開	45
5-1 まとめ	45
5-2 そのほか	45
5-3 今後の課題	45
5-4 今後の開発計画	46

0 序論

 一般的に、赤外線とは 1µm から 1000µm の波長域を指し、1~5µm は近赤外線、5~25 µm は中間赤外線、25~1000µm は遠赤外線と呼ばれて分類されている(100~1000µm は サブミリ波と呼ばれることもある)。近赤外線はさらに I(0.88µm)、z(1.05µm) J(1.235µm) H(1.635µm) K(2.24µm)の波長帯に分けられる。

これらの波長帯は、大気中の水蒸気やメタンによる吸収がほとんどない、いわゆる「大気の 窓」になっており、地上にある光・赤外線望遠鏡で観測を行うことができる。ハワイ島のマウ ナケア山頂は、標高が高く湿度が低いため、大気による吸収量が少なく、特に可視・近赤外線 観測に適した場所であり、日本はそこに世界でも最大級の口径 8.2mの光・赤外線望遠鏡「す ばる」を建設した。その集光力と駆動精度の高さは秀逸で、主焦点、カセグレン焦点、ナスミ ス焦点のそれぞれの特徴を活かした観測装置が次々と立ち上がっている。

現在、私たちはカセグレン焦点の能力を最大限に活かせる最も基本的な近赤外線撮像分光装置の一つとして、MOIRCS(Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph)の開発をすすめている。これは、すばるカセグレンの持つ 6 という広視野で、Kバンドまでの冷却マルチスリットマスクによる多天体分光観測を可能にする装置である。本論文では、MOIRCSが拓く天文学と、その開発において目玉の一つである冷却マルチスリット交換機構の開発・基本設計について述べる。



図 1 近赤外波長域の大気の窓 CFHT ホームページより抜粋

1 MOIRCS による近赤外線観測

1-1 z>3の遠方銀河の星生成史

1-1-1 赤方偏移した輝線の検出から求める星生成率

銀河のスペクトルの 912 (ライマン端)より短い波長が銀河間ガス中および銀河星間ガス 中の中性水素の吸収によって急激に強度が落ち、あるバンドで見えていたものが、その隣のバ ンドでは見えなくなるという現象を利用したドロップアウト法による効率よい遠方の候補天体 選択と、Keck など大望遠鏡での分光観測によって、1990 年代半ばより、Z=3 を越える高赤方 偏移の若い銀河が大量に検出されるようになり、初期宇宙での銀河の星形成や空間分布などの 様々な性質を「直接」観測的に研究することが可能になった。現在まで、主として Steidel らの グループの活躍により、Z~3 の銀河が約 1000 個程度、Z>4 の銀河が 50 個程度、同定されて いる (Steidel *et al.* 1999)。これらの銀河における星形成、ガスの運動などの情報を得ること により初期宇宙における銀河の星形成史について統計的研究を行う。

従来は、星形成率の測定は[OII](3727))禁制線の強度や紫外光のフラックス強度などから 見積もられてきた。連続的な星形成史と初期質量関数(Salpeter IMF)を仮定した場合、平均 的な単位体積あたりの宇宙の星形成率は1立方Mpcあたり0.03 M_{solar}/yr程度と求められている。

しかしこれまで多数の文献によって指摘されているとおり、一般的に星形成現象にはガス・ ダスト密度の濃い環境が付随するため、観測された見かけの紫外線光度は星間吸収の影響をう けている可能性が高い。例えば、Poggianti *et al.*(1999)は、遠方銀河団中のいくつかの銀河に ついて[OII]輝線とH 輝線(6563)の等価幅(EW)を比較した(図2),H は強いが、[OII] があまり強くない銀河がいくつかある。これは、[OII]よりも長波長側にあるH ではダストに よる吸収の影響が少ないことを示唆している(はバルマー線吸収の強い銀河、 はバルマー 線吸収の弱い銀河を示している)。



図 2 MORPHS 銀河団のいくつかの銀河に対する[OII]とH の輝線等価幅(EW)の比較 実線は近傍の普通の銀河に対する輝線比 (Poggianti *et al.* 1999)

銀河進化スペクトルのモデルと併せた紫外線領域のスペクトルの傾きからは、典型的には、

Calzetti の吸収則に従って E(B-V) ~ 0.2 等程度の吸収を受け、波長 1500 の紫外線では約8分 の1程度まで減光を受けていると見積もられている(Meurer *et al.* 1999)。従って、これら 高赤方偏移の星形成銀河の星形成率を正しく評価するためには、(1)吸収の影響を補正する、 もしくは(2)吸収の影響の少ない長波長側(静止系での可視波長域)での電離輝線を用いる、 などの手段が有効となる。



図 3 紫外線光度から求めた星形成率 (Steidel et al. 1999)

赤方偏移 2~4の Lyman Break 銀河の近赤外線分光観測はこれまでにもいくつかの研究報告 がある。Pettini *et al.*(1998)は、*Z*=3~4の銀河数個について、UKIRT 望遠鏡(3.8m) + CGS4 分光器を用い、正味 6~9 時間の積分をかけて JHK バンドでの分光観測を行った(図4)。彼 らは、紫外線光度から求めた星形成率と、観測で得られたH や[OII]、[OIII]などの輝線から求 めた星形成率を比較し、可視波長域の電離輝線から求められた値が系統的に大きく、銀河の色 ともわずかに相関している可能性を示唆した。しかし、図4を見てもわかるとおり、個々のス ペクトルの S/N 比は決して大きくはなく、観測された銀河数も統計的議論を行うには少なすぎ る。よって、すばるなどの口径の大きな望遠鏡を用いて、こういった分光観測をさらに行う必 要がある。静止系の紫外線波長域では、Ly を含めた顕著な輝線が吸収などを受けて観測され ない場合も多いが、静止系で可視域の輝線、例えばH 、H 、[OIII] 5007、などの観測を行 えば、吸収の影響の見積もりだけでなく、銀河ガスの運動、電離励起状態も知ることができる。



図 4 z~3の天体のスペクトル (Pettini et al. 1998)

1-1-2 観測の実現性

Kennicutt(1999)より、H と[OII]の輝度から求める星形成率は、近傍の銀河については比較的精度良く求められていて、以下のように与えられている。

SFR [Msolar/yr] = 7.9 × 10-42 \angle (H) [erg/s] SFR [Msolar/yr] = (1.4 ± 0.4) × 10-41 \angle ([OII]) [erg/s]

例えば、Pettini *et al.*(1998)とSteidel *et al.*(1999)によって分光された*z*>3の50個あまりの遠方銀河について、観測で同定された赤方偏移を用い、それらの銀河の星形成率を100~200M_{solar}/yrと仮定し、期待されるH と[OII]のフラックスを求め、それをすばる望遠鏡+MOIRCSで観測した場合に得られるS/N比を求めた(表 1)。H の星形成率は、H 輝線とH

輝線の強度比をL(H)/L(H)=2.87(天体の温度を10⁴Kの黒体と仮定)として求めた。宇宙 論パラメータは H_0 =50 km/s/Mpc、 q_0 =0.5 を仮定し、R=500 で積分4時間の分光を行ったと仮 定した。望遠鏡の効率、MOIRCSの光学系の効率、検出器の量子効率の全てを含めた効率を 0.3 とした。マウナケア山頂でのスカイの明るさはCFHTの1997年の観測マニュアルから引用 し、大気の透過率は波長に寄らず0.8 と仮定した。積分4時間で、[OII]はおよそS/N=8~10、 H はS/N=5 程度で観測できることがわかる。ただし、[OII]輝線の強さには数倍の不定性があ る。ここで、H のほとんどと[OII]の半数がKバンドにはいってきていることに注目する。

また、これらのうち2つの領域について、銀河の位置を相対座標にプロットしたのが図5で ある。ピンクの円はMOIRCSの視野6 である。ひとつの視野に数個の銀河が入っているこ とがわかる。*2*>3~4 の遠方銀河の星形成史についてさらに統計的な議論をするためには、サ ンプルの数をもっと増やす必要があるが、これらの銀河をシングルスリットで一つ一つ深く追 観測していたのでは、膨大な時間がかかり現実的な議論にならない。これを近赤外線での多天 体分光モードを持つMOIRCSを用いて、いくつもの天体を同時に深く分光すれば、数~10倍 もの効率で分光観測を行うことができるのである。

つまり、遠方銀河の星形成史の研究では、K バンドまでできる近赤外多天体分光装置が圧倒 的な威力を発揮すると言える。



図 5 MOIRCS 視野内の天体

					[0]					Н		
Object	Z	r		band		F	S/N		band		F	S/N
		[Gpc]	[m]		[µm]	[J/sec/m2]		[m]		[µm]	[J/sec/m2]	
CDFa-G1	4.815	40.84	2.167E-06	К	4.335E-03	3.592E-20	6.477	2.827E-06	-	5.653E-03	2.219E-20	-
CDFa-GD3	4.050	33.63	1.882E-06	к	3.764E-03	5.297E-20	8.901	2.455E-06	к	4.910E-03	3.272E-20	4.375
CDFa-GD4	4.189	34.93	1.934E-06	к	3.868E-03	4.911E-20	8.364	2.522E-06	-	5.045E-03	3.033E-20	-
CDFa-GD7	4.065	33.77	1.888E-06	к	3.775E-03	5.254E-20	8.841	2.462E-06	к	4.924E-03	3.245E-20	4.345
CDFa-GD9	3.864	31.90	1.813E-06	н	3.626E-03	5.888E-20	9.170	2.364E-06	к	4.729E-03	3.637E-20	4.772
CDFa-GD14	3.613	29.58	1.719E-06	н	3.439E-03	6.848E-20	10.386	2.242E-06	к	4.485E-03	4.229E-20	5.405
CDFb-G1	4.077	33.89	1.892E-06	к	3.784E-03	5.219E-20	8.793	2.468E-06	к	4.936E-03	3.223E-20	4.321
CDFb-G5	4.486	37.73	2.045E-06	к	4.089E-03	4.211E-20	7.374	2.667E-06	-	5.333E-03	2.601E-20	-
CDFb-GD3	3.694	30.33	1.749E-06	н	3.499E-03	6.515E-20	9.967	2.282E-06	к	4.564E-03	4.024E-20	5.187
CDFb-GD9	3.777	31.10	1.780E-06	н	3.561E-03	6.197E-20	9,565	2.322E-06	к	4.644E-03	3.828E-20	4.977
CDFb-GD10	4 070	33.82	1 890F-06	ĸ	3779E-03	5239E-20	8 821	2465E-06	К	4 929E-03	3236E-20	4 3 3 5
CDFb-GD12	3 4 6 9	28.26	1.666E-06	н	3.331E-03	7 503E-20	11 202	2 172E-06	ĸ	4.345E-03	4.635E-20	5 829
CDFb-GD13	3 761	30.95	1 774F-06	н	3 549E-03	6 257E-20	9.641	2.314E-06	ĸ	4.629E-03	3864E-20	5.017
CDFb-GD14	4 253	35.53	1.958E-06	ĸ	3 916E-03	4746E-20	8 1 3 4	2.553E-06		5 107E-03	2 932E-20	-
B20902-C1	4.200	36.14	1.930E-00	ĸ	3.964E-03	4.740E-20	7 0 1 0	2.535E-06	_	5.170E-03	2.952E-20	-
B20902-01	4.020	22.52	1.9021-00	ĸ	2 756E 02	5 220E 20	9.046	2.3032-00	- K	1 900E 02	2.0000=20	4 207
B20902-GD5	4.039	33.33	1.0/0E-00	ĸ	3.750E-03	5.330E-20	0.940	2.449E-00	<u>r</u>	4.099E-03	3.292E-20	4.397
	4.204	35.07	1.940E-00	ĸ	3.079E-03	4.071E-20	0.309	2.550E-00	-	5.059E-03	3.009E-20	
HDF-G4	4.421	37.11	2.020E-06	r.	4.041E-03	4.351E-20	1.575	2.035E-00	-	5.270E-03	2.087E-20	-
HDF-GD4	4.129	34.37	1.912E-06	ĸ	3.823E-03	5.072E-20	8.590	2.493E-06	ĸ	4.986E-03	3.133E-20	4.222
30324-62	4.434	37.23	2.025E-06	ĸ	4.051E-03	4.322E-20	7.534	2.641E-06	-	5.283E-03	2.670E-20	-
3C324-GD2	4.071	33.83	1.890E-06	K	3.780E-03	5.236E-20	8.817	2.465E-06	K	4.930E-03	3.234E-20	4.333
DSF1550-G4	4.133	34.41	1.913E-06	K	3.826E-03	5.061E-20	8.574	2.495E-06	K	4.990E-03	3.126E-20	4.214
DSF1550-GD10	3.914	32.37	1.831E-06	н	3.663E-03	5.720E-20	8.955	2.389E-06	К	4.777E-03	3.533E-20	4.660
DSF1550-GD18	4.144	34.51	1.917E-06	K	3.834E-03	5.031E-20	8.532	2.500E-06	K	5.001E-03	3.108E-20	4.193
DSF1550-GD22	3.894	32.18	1.824E-06	Н	3.648E-03	5.786E-20	9.040	2.379E-06	K	4.758E-03	3.574E-20	4.704
DSF1550-GD23	4.053	33.66	1.883E-06	K	3.767E-03	5.289E-20	8.889	2.456E-06	K	4.913E-03	3.267E-20	4.369
DSF1550-GD30	4.299	35.96	1.975E-06	K	3.950E-03	4.633E-20	7.974	2.576E-06	-	5.152E-03	2.862E-20	-
DSF1550-GD32	4.176	34.81	1.929E-06	К	3.858E-03	4.945E-20	8.412	2.516E-06	-	5.032E-03	3.054E-20	-
SSA22a-G3	4.527	38.11	2.060E-06	К	4.120E-03	4.125E-20	7.252	2.687E-06	-	5.373E-03	2.548E-20	-
SSA22a-G6	3.710	30.48	1.755E-06	Н	3.511E-03	6.452E-20	9.888	2.290E-06	К	4.579E-03	3.985E-20	5.145
SSA22a-G11	4.390	36.82	2.009E-06	К	4.018E-03	4.420E-20	7.673	2.620E-06	-	5.240E-03	2.730E-20	-
SSA22a-GD11	4.397	36.89	2.011E-06	К	4.023E-03	4.404E-20	7.651	2.623E-06	-	5.247E-03	2.720E-20	-
SSA22a-GD12	4.114	34.23	1.906E-06	К	3.812E-03	5.114E-20	8.648	2.486E-06	К	4.972E-03	3.159E-20	4.250
SSA22b-GD7	3.895	32.19	1.824E-06	Н	3.649E-03	5.783E-20	9.036	2.379E-06	К	4.759E-03	3.572E-20	4.702
SSA22b-GD9	3.856	31.83	1.810E-06	Н	3.620E-03	5.915E-20	9.205	2.361E-06	К	4.721E-03	3.654E-20	4.790
SSA22b-GD10	4.086	33.97	1.896E-06	К	3.791E-03	5.193E-20	8.757	2.472E-06	К	4.945E-03	3.208E-20	4.304
DSF2237a-G3	4.400	36.91	2.013E-06	К	4.025E-03	4.398E-20	7.641	2.625E-06	-	5.250E-03	2.716E-20	-
DSF2237a-G7	3.838	31.66	1.803E-06	Н	3.606E-03	5.978E-20	9.285	2.352E-06	К	4.704E-03	3.692E-20	4.832
DSF2237a-G10	4.467	37.55	2.038E-06	К	4.075E-03	4.251E-20	7.432	2.658E-06	-	5.315E-03	2.626E-20	-
DSF2237a-GD3	3.964	32.83	1.850E-06	к	3.700E-03	5.559E-20	9.261	2.413E-06	к	4.826E-03	3.434E-20	4.552
DSF2237a-GD7	4.453	37.41	2.032E-06	К	4.065E-03	4.281E-20	7.475	2.651E-06	-	5.301E-03	2.644E-20	-
DSF2237a-GD10	4.189	34.93	1.934E-06	к	3.868E-03	4.911E-20	8.364	2.522E-06	-	5.045E-03	3.033E-20	-
DSF2237b-G2	4.178	34.83	1.930E-06	к	3.860E-03	4.940E-20	8.405	2.517E-06	-	5.034E-03	3.051E-20	-
DSF2237b-G4	4.492	37.78	2.047E-06	к	4.094E-03	4.198E-20	7.356	2.670E-06	-	5.339E-03	2.593E-20	-
DSF2237b-G12	4.375	36.68	2.003E-06	к	4.007E-03	4.454E-20	7.722	2.613E-06	-	5.226E-03	2.751E-20	-
DSF2237b-GD6	4.486	37.73	2.045E-06	к	4.089E-03	4.211E-20	7.374	2.667E-06	-	5.333E-03	2.601E-20	-
DSF2237b-GD11	3,679	30.19	1.744E-06	Н	3,488E-03	6.574E-20	10.043	2.274E-06	к	4.549E-03	4.061E-20	5,226
DSF2237b-GD12	3,868	31.94	1.814E-06	H	3.629E-03	5.874E-20	9,153	2.366E-06	ĸ	4.733E-03	3.628E-20	4,763
		1				バンドが無	記入の	ものはフィル	レタの	吸収によっ	て観測不可	

表 1 z~4の銀河の MOIRCS での観測

1-2 遠方銀河団の近赤外分光サーベイ

銀河団は、現在の宇宙において最も銀河密度の高いところである。銀河団領域の形成された 時期や進化の歴史、また銀河団を構成する銀河の形成・進化の歴史を辿るには、宇宙の遠方ま で赤方偏移を遡って銀河団を同定し、その銀河の分布や性質を調べる必要がある。現在では、 可視・X線などで、赤方偏移1程度までの広域にわたる銀河団のサーベイが行われている。

しかし、可視波長域でのディープサーベイでは、赤方偏移1を越える銀河団を同定すること は困難である。現在観測されている銀河団中にある大半の銀河については、それらを構成する 星の平均年齢はかなり古い(>10Gyr)ことがわかっている。よって、赤方偏移が1を越え、4000

break が可視よりも長波長側にずれると、可視波長域では銀河は大変暗くなり、また急激に 増加する微光青色銀河(faint blue galaxies)の影響も受け、検出が大変困難になる。一方で、前 節で述べたH、H、[OII]輝線のほかにも、[OIII](5007)、SII(6716)、MgII(5200)、HeII(4686)、など目だった輝線が z>1 で近赤外波長帯にはいってくる(図6)。このことを考慮する と、遠方の銀河団のサーベイは赤外線波長帯で観測することが本質的に必要である。





現在、銀河団があるとわかっているもので、赤方偏移が 1 を超えるものはわずかである。 MOIRCS が完成するまでに、さらに複数のフィールド銀河団探査を行い、バイアスの少ない銀 河団の選択を行っておく必要がある。これから数年のうちに、すばるの Suprime-Cam や VLT の ISAAC、Keck の NIRSPEC など大望遠鏡 + 最新鋭の装置で、同様の観測が行われ、新たな 銀河団が続々と観測されるだろう。これまで可視波長帯の観測によって築かれてきた銀河種族 の統計的解釈をさらに遠方銀河団へと拡張するためには、高解像度のすばる望遠鏡と効率の良 い分光的赤方偏移サーベイを行うことが絶対に必要なのである。

2 MOIRCS の概要

2-1 装置の概要

近赤外線多天体分光撮像装置 MOIRCS (Multi-Object InfraRed Camera and Spectrograph) は、国立天文台ハワイ観測所と東北大が共同で開発をすすめている装置である。

この装置は、現在、近赤外線検出アレイとしては世界で最大のフォーマット(2048×2048 ピクセル、ピクセルサイズ18µm)を持つ「HAWAII-2」を2枚並べ、1ピクセルあたり0.117 のサンプリングレートですばる望遠鏡のカセグレン焦点面の視野約 6 をカバーし、0.8~2.5 µmの波長帯で、撮像モードと、冷却マルチスリットによる分光モードを持つ。すばる望遠鏡 の集光力と組み合わせることで、近赤外での広視野・高空間分解能を備えた強力なサーベイパ ワーを持つ装置である。

この装置プロジェクトは 1999 年夏に始まり、現在は鈴木竜二(東北大)が担当する光学系 の設計がほぼ固まりつつある。また「HAWAII-2」検出器の駆動は市川隆、浅井研一郎、鈴木竜 二(いずれも東北大)が主に担当しており、2001 年前半にはファーストライトを迎える予定で ある。MOIRCS の目玉でもある、冷却多天体分光モードは、主に私と、西村徹朗、小俣孝司、 土井吉行、Kerry M. Martin (いずれもハワイ観測所)が担当し、現在は設計と平行して一部製 作と実験をはじめている。MOIRCS のファーストライトは 2003 年初頭を予定している。



図 7 MOIRCS 全体像(横から)

2-2 光学系

光学系は鈴木竜二が主に開発・設計をすすめている。ここでは本論文の理解の助けとなる部 分を簡潔に説明する。詳細は鈴木(2001)を参照されたい。

MOIRCSの光学系は、コリメータ、カメラの2つの部分から構成される。

コリメータは、分光モードでグリズムに平行光を入れるための光学系で、光線が平行になった瞳位置に、グリズムなどの分散素子やフィルタを置く。また、赤外線カメラに特有の工夫として、瞳位置にLyot Stop(またはコールドストップ)という冷却した有効絞りを入れることで 望遠鏡や装置自身からの熱輻射や迷光を遮断する。

カメラは、コリメータを出た光を検出器に結像させる光学系で、様々な収差を最小限に抑え る設計になっている。光学系の全体図を図 8 に示す。

MOIRCS ではカセグレン焦点面での像のわん曲を補正するための光学系(フィールドフラットナ)は採用しない。焦点面上での像のわん曲による像の広がりとシーイングが良いときの像の広がりがほとんど同じ程度になるためと、焦点面周辺は空間的に狭く、大きなレンズを置いて冷却する機構によって装置の構造がさらに複雑になるのを避けるためである。



図 8 光学系全体図 鈴木(2001)より引用

6 という広視野をサンプリングレート 0.117"/pix という高空間分解能で結像させるため、 HAWAII-2 という大フォーマット検出器が2枚用必要になる。しかし、HAWAII-2 は検出器周り のパッケージに余分な厚みがあり(バタブルでないため)、そのまま並べただけでは視野のまん なかが抜けてしまう。そこで、焦点面のすぐ下にルーフ状の平面鏡を置き、視野を2つに分割 してそれぞれ別の検出器に結像させる「視野分割光学系」を採用している。焦点面付近の視野 分割機構光学系のレイアウトを図9に示す。



コリメータレンズ



図 10 検出器のモザイク化

「広視野、広波長域(0.8-2.4µm)にわたって結像精度の良い光学系」を設計することは一般に非常に難しい。例えば、広視野から集光した収束光は、大きな角度を持つため、視野のまんなかと端では、光学素子に入射する角度の差が大きくなり、収差が大きな問題となる。また赤外線で透過率の良いレンズ材は限られている上に、すばるカセグレン焦点面を覆うようなレ

ンズの大きさは最大で直径 200mm にもなり、レンズとしては質量が大きくなり、自重による たわみも問題になる。

光学素子は、外部からの熱輻射と迷光を避けるため、光路をすっぽり覆うような筒状のオプ ティカルチューブにマウントされる。オプティカルチューブは、デュワーにしっかりと固定さ れたオプティカルベンチ(光学定盤)に固定される。光学素子もデュワー中で冷却されるため、 透過率や屈折率などの光学特性が変わったり、熱収縮によって形状が変化して光路がずれたり することがある。また冷却によって、金属製のレンズマウントが収縮変形してレンズに過剰な 力をかけたり、逆にレンズが収縮することで固定が緩んだりすることもある。こういった問題 は、光学素子やマウント材質の低温での物性値を用いて光学設計と冷却シミュレーションを繰 り返し行い、できるだけ現実に近い状態を想定しながら設計をすすめる。さらに、これらの問 題をある程度許すような公差を持った光学系を設計することも大事な点である。

2-3 検出器

赤外線アレイ検出器の開発は、CCD(電荷結合素子)に少し遅れて 1990 年頃から急速に開発が進み、大フォーマットの赤外アレイ検出器の登場によって、より暗い天体の観測も可能となり、様々な天文学的成果を生み出している。

Rockwell 社製の HAWAII-2 は、素子は HgCdTe(水銀・カドミウム・テルル)で 0.85~2.5 µm に 感度があり、赤外検出器の中でも最も感度が高いものの一つである。現在、赤外焦点面アレイ 検出器 (FPA: Focal Plane Array)としては世界最大フォーマットの 2048 × 2048(400 万)画素 を持つ。検出器は冷却することで暗電流(ダーク)が抑えることができるので、観測時には駆 動最適温度(約 78K)に維持する。

2000 年 11 月に HAWAII-2 検出器の駆動部分であるマルチプレキサの駆動に成功した。図 11 (右)は、マルチプレキサを冷却して懐中電灯の光をあてたときに各画素がフォトダイオード として働いているものが画像として見えている。2001 年前半には検出器を載せてファーストラ イトを行い、詳細な性能評価をする予定である。カメラの焦点面で2つの検出器を並べるモザ イキングや、フォーカス合わせのための微細駆動機構の設計などもすすめていく。







図 11 HAWAII-2 検出器 (左) とマルチプレキサ駆動の様子 (右)

2-4 冷却マルチスリットによる MOS 機構

MOIRCS はIバンドから K バンドまでの撮像モードと、冷却したマルチスリットマスクを使った多天体分光(MOS:Multi-Object Spectrograph)モードを備える。スリットマスクの製作やファイバの冷却が技術的に困難なことから、K バンドでのマルチスリットによる多天体分光装置はこれまでに例がない。しかし「すばる」の集光力と広視野を活かすには、K バンドまでの多天体分光は必須であり、これが MOIRCS の目玉機能でもある。

多天体分光機構は、観測ごとに天体の位置に合わせてスリットを切った数枚のマスクを、真空・冷却した装置の中に待機させ、観測ごとに目的のマスクを取り出し、焦点面に装着して分 光観測を行い、また次のマスクに交換する、というのが主な役割である。

本論文3章以降でこの冷却マルチスリット機構の設計について詳細に述べる。

2-5 真空冷却デュワー

近赤外線の観測装置は、装置自身の熱輻射が検出器に入射してノイズとなるのを抑えるため、 光学素子などを含めた装置全体を冷却する。MOIRCSは、光学素子や検出器のある「本体デュ ワー」と、マルチスリットマスクを収納する「スリットデュワー」の二つのデュワーを備えて おり、これらの冷却には独立した冷凍機を用いる予定である。

内部のメンテナンスのしやすさを考慮しながら、構造解析・冷却解析などを行って、必要な 強度を満たしかつシンプルな構造になるよう設計していく。



図 12 MOIRCS 概念図(3D)



図 13 MOIRCS 本体デュワー

2-6 限界等級

ハワイのマウナケア山頂で、すばる望遠鏡と MOIRCS の組み合わせで観測したときに得られる限界等級を見積もった。光学系のロス、分光素子の分光特性、検出器の量子効率、ノイズ、スカイバックグラウンドノイズ、シーイング等を考慮しなければならないが、現在はどれも設計段階なので、およそ見込まれる値を用いた。

見積もりにおいて、すばるの口径を 8.2m とし、主鏡・副鏡の効率×光学系の効率×検出器の量子効率を波長に依らず撮像では 0.4、分光では 0.3 とした。

1 ピクセルあたりの S/N比 (Signal to Noise Ratio)を求める基本式は以下のように表せる。

I
$-\frac{1}{\sqrt{\sigma_{R}^{2}+\sigma_{AD}^{2}+t\times\left(I_{S}+I_{BG}+I_{DC}\right)}}$
天体からのシグナル [e⁻/s]
積分時間 [s]
スカイからのノイズ [e ⁻ /s]
検出器の暗電流(ダーク)ノイズ [e ⁻ /s/pix]
A/D変換ノイズ [e ⁻ /pix]
検出器のリードアウトノイズ [e‐/pix]

2-6-1 撮像

撮像において、近赤外領域ではスカイからのバックグラウンドノイズが最も大きく、限界等級はスカイの明るさで決まる。これをバックグラウンドリミテッドという。マウナケア山頂でのスカイの明るさは CFHT のマニュアルから引用した(表 2)。ベガのフラックスを各バンドで0等とし、その絶対フラックスは Blackwell *et al.*(1983)より引用した。

バンド	有効波長 [μm]	面輝度 [mag/arcsec ²]	放射強度 [photons/cm²/s/ µ m/arcsec²]
Jバンド	1.23	14.8	2.49
Hバンド	1.66	13.4	4.20
Kバンド	2.22	12.6	3.98

表 2 マウナケア山頂での空の明るさ CFHT ホームページより引用

バックグラウンドリミテッド観測での S/N (シグナルとノイズの比)を求める場合、上の式からスカイのノイズだけを考慮して以下の式で表せる。

$$\frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 t Q \frac{f_{\lambda} \Delta \lambda}{h\nu}}{\sqrt{\frac{\pi}{4} D^2 t Q \frac{S_{\lambda} \Delta \lambda A}{h\nu}}} = \sqrt{\frac{\pi}{4} D^2 t Q \frac{\Delta \lambda}{h\nu}} \frac{f_{\lambda}}{\sqrt{S_{\lambda} A}}$$

- D 望遠鏡の口径 [m]
- t 積分時間 [s]
- Q 望遠鏡の効率(0.96) × 光学系の効率(0.64) × 検出器の量子効率(0.65)
- f 天体からのシグナル [J/s/m²/m]
- f 波長幅 [m]
- S スカイからのシグナル [J/s/m²/m/sr]
- A 天体の広がりに相当するスカイの視野 [sr]



1 時間積分の撮像観測で S/N=10 が得られる限界等級は、J バンドで 25.0mag、H バンドで 24.8mag、K バンドで 23.8mag となる。

2-6-2 分光

MOIRCS は R=500~2000 の低中分散分光モードを備える。分光では、観測のモードによっ て限界等級をリミットするものが変わってくる。1~2µm では連続光の輝度よりも 100 倍以上 強い OH 夜光が著しく、2µm 以上では熱輻射が急激に増加するなど、近赤外ではスカイの明 るさが激変する。遠方銀河からのかすかな光を分光する場合、すばるナスミスの OHS(夜光除 去分光器)のように原理的に OH 夜光を取り除かない限り、整約ソフトによるスカイの差し引 きだけでは OH 夜光の影響をきれいに取り除くことはできない(OH 輝線の輝度レベルが高い ために、それを差し引いてもノイズの影響は残る)。



図 14 近赤外波長域での背景輻射

また分解能Rがあがると、一つのスリット像に入る波長幅は短くなり、天体やスカイからの 光が減るため、積分時間や読み出しの回数によってはダークノイズやリードアウトノイズの量 が無視できない大きさになる。また、赤方偏移のわからない遠方の天体のサーベイでは、期待 するH などの輝線がどこに現れるかわからないので、スカイの明るさには、熱輻射による連 続光とOH夜光の各バンド内での寄与を平均したフラックスを用いた。ただし、R=2000 モード については、スカイの明るさに連続光の値のみを用いて計算したもの(分解能が高く、OH夜 光と天体の輝線が完全に分離される場合が想定されるため)さらにダークノイズとリードアウ トノイズも考慮したものについても計算を行った。その際、ダークはHAWAII-2 のカタログ値 より 0.3e⁻/s、リードアウトノイズは検出器駆動系の目標値である 20 e⁻とした。1 回の積分時 間を 100 秒として、総積分時間を 1 回の積分時間で割ったものを読み出しの回数としてリード アウトノイズに乗じた。J、H、K各バンドについて、S/N=5 が得られる限界等級は図 15 のよ うになる。

4 時間積分で S/N=5 が得られる限界等級は、R=500 のとき J バンドで 23.0mag、H バンド で 22.5mag、K バンドで 21.6mag となった。



図 15 分光の限界等級 (J,H,K バンド)

2-7 MOIRCS のライバル装置(世界の近赤外多天体分光器の現状)

大型望遠鏡の集光力と広視野を活かした近赤外での多天体分光観測は、遠方銀河のサーベイ (探査)観測に威力を発揮する。ここ数年で、口径が8~10m級の大型光学望遠鏡が次々と立 ち上がったのに伴って、各望遠鏡で赤外多天体分光装置の開発計画がはじまっている。

既に可視波長域では VLT の FORS、すばるの FOCAS などで多天体分光が行われている。また、近赤外線でも H バンドまでなら、VLT の NIRMOS のスリット多天体分光モード、すばる の OHS のファイバ多天体分光モードなどの開発がすすめられている。しかし技術的な困難から、広視野・高空間分解能をもち、K バンドまでをスリットで多天体分光できる装置はいまだに例がない。広視野・近赤外・K バンドまで多天体分光という点で見た、まさに MOIRCS のライバルとなる装置のいくつかを表3 にまとめた。MOIRCS とほぼ同時期の完成をめざす近赤外多天体分光器がいくつかある。より早く装置を立ち上げ、天文学的効果を挙げることは、開発の最大のモチベーションである。

	MOIRCS	EMIR	FLAMINGOS	LUCIFIR
Telescope	Subaru	GTC	Gemini etc.	LBT
	8.2m	10.0m	8.1m	8.2m
Team	NAOJ + Tohoku Univ.	IAC + Yele Univ.	Florida Univ.	CAE
Band Filter	I, z, J, H, K	z, J, H, K	J, H, K, K'	z, J, H, K
F.O.V	6	6 ×6	5 ×5	4
Sampling Rate	0.117 /pix	0.175 /pix	0.14 /pix	0.12 /pix
Resolution	500 - 2000	3500 - 4000	600 - 2000	< 5000
Detector	HAWAII-2 × 2	HAWAII-2	HAWAII-2	HAWAII-2
Imaging				
Spectroscopy	Slit + Grism	Slit + Grism	Slit+Grism	Fiber + Microlens
MOS	Cooled Multislit	Multislit	Cooled Multislit	Cooled Fiber
Operation	2003	2003	Now Operating	2002

表 3 MOIRCS のライバル装置



図 16 EMIR (左) と FLAMINGOS (右) 各ホームページから引用

2-8 主な仕様のまとめ

本体	
望遠鏡	すばる望遠鏡
視野	約 6 (21arcmin ²)
動作環境	- 10 ~ + 30
観測モード	撮像 + スリット分光
光学系	
透過光学系	コリメータ4枚/カメラ6枚
最適化波長域	0.80 ~ 2.40 μm
瞳径	50 mm
F値 (コリメータ)/F値 (カメラ)	12.41 / 3.926
縮小率	0.316
分光分解能	500 – 2000
フィルタの種類	l, z, J, H, K, K', 各種干渉フィルタ
グリズム	I, z, J, H, K
効率(フィルタなし)	64 %
機械系	
大きさ	2m×2m以内(必須)
総重量	2t 以内 (必須)
フィルタ収容枚数	未定
シャッター(瞳位置)	あり
検出器	
素子	HAWAII-2 × 2枚
画素サイズ	18 µ m
イメージスケール	0.117arcsec/pix
量子効率	0.65
読み出し時間	10 sec(目標値)
リードアウトノイズ	20 e ⁻ (目標値)
MOS機能	
スリット機構	固定スリット方式
スリット加工法	放電加工(?)
マスク収容枚数	30~50枚
スリット数	~50 本/マスク
スリット形状	矩形
性能	
効率	撮像 0.4/ 分光 0.3 (目標値)
限界等級(撮像) 1hr, S/N=10	J:25.0mag, H:24.8mag, K:23.8mag
限界等級(分光) R=500,4hr, S/N=5	J:23.0mag, H:22.5mag, K:21.6mag

表 4 MOIRCS 仕様・性能のまとめ

3 冷却マルチスリット交換機構の設計

3-1 多天体分光の方法

遠方銀河の分光観測は、撮像観測よりもはるかに多くの観測時間を要する。シングルスリッ ト分光では、一度に一つの天体しか分光できないため、遠くて暗い銀河の赤方偏移サーベイや 銀河団の分光などには適していない。これを解決するのが、「多天体分光」である。多天体分光 器には大きく分けて2種類ある。「マルチスリット分光」方式は、視野内の天体の位置に合わ せて複数のスリットを切ったスリットマスクを焦点面に置くものや、ロボットアームで制御さ れた可動スリットを天体の位置に置くものがある。「ファイバ多天体分光」方式は、複数の光フ ァイバを焦点面に並べたり、ロボットアームで天体の位置にファイバを置いたりしてスリット まで光を誘導する。マルチスリット分光では、焦点面での天体の位置がそのまま検出器上での スペクトルの位置に対応するが、ファイバ多天体分光では、天体の光を並べ替えてスリットに 入れるので、検出器を効率よく使うことができる。



図 17 マルチスリット分光とファイバ多天体分光の原理

ファイバ多天体分光は、背景の空の差し引きに系統誤差がでやすいことや、ファイバ機構全体を冷却することが困難で、装置からの熱輻射がノイズとして効いてくるKバンドまでは観測できないことなどから、高赤方偏移天体の観測には向いていない。また光ファイバ部分での光

量のロスや、アパーチャが大きいことによるスカイ光の混入のために、ファイバ多天体分光の 限界等級はマルチスリット分光のそれよりもおよそ1等級浅いと言われている。

しかしファイバ多天体分光は、大幅な観測効率の向上が狙えるため、現在開発が盛んに行われている。例えば、アングロオーストラリア望遠鏡(AAO)の 2dF は 400 本ものファイバチャンネルを持っている。すばる望遠鏡の OHS は 46 本のファイバを備えた H バンドまでのファイバ多天体分光モードがある。

一方、マルチスリット分光装置も可視光波長域では盛んに開発され、VLAのVIRMOS、すば る望遠鏡のFOCASなどが既に観測を行っている。そして90年代後半からの光学望遠鏡の巨 大化に伴い、その集光力を活かし、できる限り限界等級を延ばし、より深い宇宙まで観測を目 的とした近赤外線波長域でのマルチスリット分光装置の開発計画が各方面で提案されている。



FOCAS(可視マルチスリット分光)



SDSS(可視ファイバ多天体分光)

冷却マルチスリットによる分光観測の手順を図 18 に示した。ある晩に、分光観測を行いた い視野の撮像観測データが得られたら、すぐにスリットをあてる天体を選定し、位置を決定し、 観測終了後にマスクの加工を開始する。できあがったマスクをスリット用のデュワーに入れて 真空・冷却をして準備完了、次の晩には分光観測を行う、という手順になっている。昼間の作 業を 10 時間程度で終わらせることが目標だが、実際にはかなり難しい。各工程とも精度の許 す限りに、相当の効率化と時間短縮をねらう必要がある。





冷却マルチスリット分光の実現のためには、様々に絡み合う技術的課題をひとつひとつ検討 していかなければならない。これから、以下の検討項目を中心に開発をすすめていく。 真空・冷却空間での精度よいマスクの交換機構
交換機構各パーツの高速冷却の工夫
スリットマスクの材質の選択
スリットの加工方法(加工時間)
スリット位置の決定
スリットマスクの設定温度
スリットマスクの冷却方法(冷却時間)
マスク冷却によるスリット形状の変形

3-2 スリットマスク交換機構

冷却スリット交換機構の全体の概念を図 19 に示す。



図 19 スリット交換機構

さらに詳細な機構を示したのが図 20 である。スリットマスクを数十枚収納(ストック)するのが「マスクストッカ」その中から目的のマスクを選びだしてマスクの交換をする機構を「マスクチェンジャ」、露出中にマスクを保持する固定機構が「マスクホルダ」である。それぞれの機構の役割を以下にあげる。



図 20 焦点面付近を上(望遠鏡側)から見たところ

3-2-1 マスクストッカ

MOIRCS 本体デュワーとは独立した真空・冷却機構を持ったスリットデュワーの中で、一度 に 30~50 枚のスリットマスクを収納する機構である。マスクは図 20 のように、中心軸の周 りに放射状に並べて収納する。この中心軸を回転させることで、目的のマスクが次節に述べる 直線導入器の掴み手の正面にくる。このストッカ内で待機する際、スリットマスクはそれぞれ の固定部分を通して冷却される。冷却には冷凍機を使用する。図 20 左上にある冷凍機は、マ スクストッカ専用の(検出器や光学系を冷却する冷凍機とは独立した)冷凍機である。2 段式 冷凍機の、冷却パワーが大きい第一段(約77K)をマスクの冷却に使用し、第2段(約20K) の先にはモレキュラシーブスボックスを取りつけ、少しでも排気速度を短縮できる構造にする。

スリットデュワーは、本体デュワーのカセグレン焦点面付近の側面に、真空ゲートバルブを 介して取りつける。ゲートバルブは、真空をシールするためのバルブで、間口が大きい(コン ダクタンスが大きい)のが特徴である。これを閉じていれば、本体デュワーの中を真空・冷却 に維持したまま、マスクデュワーだけを大気圧に戻し、加工したマスクの入れ替えをすること ができる。つまり、マスクデュワーはエアロックのように機能する。



図 21 ゲートバルブ MDC ホームページより引用

3-2-2 マスクチェンジャ

マスクストッカから一枚のマスクをつかんで取り出し、ゲートバルブを通って MOIRCS 本 体デュワーのカセグレン焦点面にあるマスクホルダまで運ぶ。取り出すときマスクは焦点面に 対して3次元的に垂直方向にあるが、ゲートバルプを通るときに90度回転して焦点面と同じ 向きになる。ストッカから焦点面までの移動距離はおよそ500mm 程度になる。よって、マス クチェンジャは「つかむ」「回転する」「直線移動」「放す」の機能を必要とする。これには、超 高真空まで対応できる直線導入器を使用する。この直線導入器は、外部からのモータ駆動によ って真空内で高精度に移動する。水平方向の可動距離は全体で約 600mm、移動精度は約 0.01mm、繰り返し位置精度は約 0.01mm、バックラッシは 0.001mm 未満が可能である。これ らの値は、ここで必要な機械精度としては十分である。また、移動距離が長い分、直線導入器 の腕が長くなるが、構造的には導入器の先端のたわみは小さいと思われる。現在は導入器の内 部の詳細が不明なので、このたわみについては見積もっていない。焦点面のすぐ下には、瞳分 割機構のルーフミラーがあり、稼動スペースはかなり狭いこともあり、直線導入期の動きは精 度が要求される。



Z only Translator(TR Series)

図 22 直線導入器 Thermo Vacuum Generator ホームページより引用

3-2-3 マスクホルダ

マスクホルダは、露出時間中に望遠鏡(天体)に対してマスクの位置がずれることのないよ う、精度よく静止を維持する必要があり(数+µm)、マルチスリット機構の中で最も精度が要 求される部分である。直線導入器で運ばれてきたマスクを4本の腕(ロボットハンド)で掴む。 この腕は、モータ駆動のパラレルグリッパで挟むようにしてマスクを固定する。焦点面周りの しかもルーフミラーの真上で動くものだけに、マスクを掴む際にどれだけ粉塵がでるかを確認 する必要がある。



図 23 マスクホルダの上から見た図(上)横から見た図(下)



Parallel Grippers (RP-P Precision Dual V Series)

図 24 パラレルグリッパ Robohand Inc.ホームページより引用

スリットマスク交換手順を次の図 25 に示す。まずはゲートバルブが閉じた状態で、本体デ ュワーを真空・冷却に保ったまま、マスクストッカのフタをあけて大気圧に戻し、加工したス リットマスクをセットする。次にマスクストッカのフタをして真空が引けたら、マスクを冷却 する。本体デュワー内とマスクストッカ内の気圧差が小さくなったら、ゲートバルブをあける。 マスクストッカを回転させて目的のマスクが定位置にくると、反対側から直線導入器の腕が伸 びて、そのマスクを掴んで引き出し、焦点面にあるマスクホルダ機構にマスクを固定する。直 線導入器はいったんマスクから離し、ゲートバルブを閉める。マスクはマスクホルダを介して 温度が制御され、マスクの温度が一定になったら観測を開始する。

マスクの交換時は、観測のおわったマスクを直線導入器が掴んで焦点面から外し、マスクス トッカにしまい、次のマスクを取り出して、カセグレン焦点面に運んで固定し、温度が安定し て次の露出を開始する。これらの動作は数分程度で完了できるようにする。



図 25 マルチスリット交換手順

3-3 スリットマスクの基本仕様

スリットマスクの基本仕様を以下に示す。

マスクの大きさは、すばる望遠鏡のカセグレン焦点面を覆う直径約200mmの円形。厚みは 0.05~0.1mmである。平らな面が保てる程度の厚みで、冷却や加工がしやすいよう、できるだ け薄くする。スリットマスクから検出器に入る熱輻射を抑えるため、マスク全体を約200Kに 冷却する(この温度については次節で述べる)。

スリットの形状は矩形で、幅(波長方向)は最も細いときで約0.1mm。これはマウナケア山 頂でシーイングの良い時が0.2 、平均でも0.3~0.5 を参考にした値である。長さ(空間方 向)は天体にも依るが1~10mmとする。マスク1枚あたりのスリットの数は、銀河団を想定 しても最大で約50個程度とし、一晩に数~数十枚を使うとする。

マスクの表(望遠鏡側)は、スカイからの輻射によってマスクの温度が上がるのを防ぐため、 鏡面加工して反射率を高くする。一方、裏(検出器側)は光学系で生じる迷光やゴーストを抑 える目的で、つや消し加工をして反射率を抑える。



図 26 マスクの基本仕様

3-4 スリットマスクの温度

図 27 に、検出器に入る様々なノイズ源を挙げた。

スカイからのノイズでは、波長1µmあたりでは大気の吸収によるOH 夜光(輝線)が顕著 である。また2.1µmより長波長側では地球大気による熱輻射(連続光)が急激に大きくなる。 これは地球の大気が有限な温度を持ち、ある放射率をもって黒体熱輻射を発するためである。 また、望遠鏡自身からも熱輻射があり、この二つの熱輻射は、私たちには抑えることができな い。一般に赤外線観測装置は、デュワーや光学素子など装置全体を冷却することで、スカイと 望遠鏡から以外の熱輻射を十分低く抑える。このため、J、H、Kバンドでの限界等級は空の明 るさによってリミットされる。これをバックグラウンドリミテッドと呼ぶ。

つまりは、装置の各部をとにかく冷却すればよいのだが、マルチスリットの場合は問題が生 じる。一様な冷却とスリットの微細加工のためには、スリットマスクの材質は金属が最も適当 である。しかし、一般に金属を冷却すると比較的大きく収縮する。この収縮によってスリット の形や相対位置が変わるのである。その結果、スリットに入る天体と入らない天体ができたり すると、多天体分光の意味がなくなる。この収縮の大きさは冷却の温度差 T[K]に比例するた め、マスクから検出器に入射する光子数が、スカイから検出器に入射する光子数より十分少な くなる程度で、しかもその温度差をできるだけ小さくするような冷却温度を設定する。この温 度見積もりが、スリットマスクの材質選択、加工方法、冷却方法、ひいては冷却マルチスリッ トでの分光の実現可能性も左右するので、厳密に考慮する必要がある。



図 27 検出器にはいる様々なノイズ源

3-4-1 スカイからの輻射

まずは、スカイからの単位時間あたりに1ピクセルに入射する光子数を求める。



図 28 スカイからの輻射

ある波長 [μ m]でのスカイの放射強度をI [photons/m²/s/ μ m/arcsec²]、スリットが見込む天 球上の角度面積をA[arcsec²]とすると、スリットに入る単位時間、単位波長あたりのエネルギ ー量は、I × S_{tel} × Aとなる。S_{tel}は望遠鏡の受光面積である。こうしてスリットに入ってくる光 のうち、分光して得られるある波長 $_0$ のエネルギー量は、分解能Rで決まる波長幅 をもつ ので、

$$I_{\lambda} \times S_{tel} \times A \times \Delta \lambda = I_{\lambda} S_{tel} A \times \frac{\lambda_0}{R}$$

と表せる。このエネルギーが、検出器上でn_{pix}個のピクセルにスカイスペクトルをつくるので、 単位時間あたりに1ピクセルにはいる光子数N_{skv}は以下のように求まる。

$$N_{sky} = \frac{I_{\lambda}S_{tel}A\lambda_0}{R} \times \frac{1}{n_{pix}} [photons/s / pix]$$

ここでは、装置の輻射がスカイ光に比べて十分小さくなるような温度を見積もりたいので、スカイの放射強度には連続光の値を用いる。これには、McLeanのテキスト「Electronic Imaging in Astronomy」にある背景輻射の図より読み取った値を使用し、1.25 μ mで 2 × 10² [photons/m²/s/ μ m/arcsec²]、1.63 μ mで 2 × 10² [photons/m²/s/ μ m/arcsec²]、1.63 μ mで 2 × 10² [photons/m²/s/ μ m/arcsec²]とした。スリットの大きさは視野にして 0.2 × 15 、サンプリングレートは 0.117 /pix、分解能*R*=2000 とした。

	1.25 µ m	1.63 µ m	2.2 µ m
スカイからの光子数	0.08×10^{-2}	1.19×10^{-1}	6 20
N _{sky} [photons/s/pix]	9.06 × 10	1.10 × 10	0.39

表 5 スカイからの光子数

3-4-2 スリットマスクからの熱輻射

次に、スリットマスクからの熱輻射によって、単位時間あたりに1ピクセルに入射する光子 数を求める。



図 29 マスクからの輻射

温度 T[K]の黒体から波長 で放射されるエネルギーは、プランクの式

$$B_{\lambda} = \frac{2 hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/k\lambda T) - 1} [W/m^3/\mu m/sr]$$

で表されるマスクのある一点から放射率 で出た波長 [µm]の光のうち、立体角 [sr]分が コリメータ、コールドストップ、カメラを通って、分解能 R で決まる をもって、拡大率 x で検出器に入射する。よって、マスク全体から検出器に入ってくるエネルギーは

$$\frac{B_{\lambda}\varepsilon}{hc_{\lambda_0}} \times \Delta\Omega \times \Delta\lambda \times A_{mask}$$

となる。実際の検出器上では、マスクのほかの点から出た光のスペクトルもその上に重なって スペクトルをつくるので、ある有効波長 ₀を中心としたひとつのスペクトルには、バンド幅

bandに相当するエネルギーが入ってくることになる。またここでは立体角の定義より、望遠鏡のF値をFtとして = /4Ft²とする。像の拡大率は、望遠鏡のF値をFt、カメラのF値をFcとして、x=Fc/Ftで与えられる。MOIRCSはFt=12.41、Fc=3.926 で、つまりマスクの大きさは検出器上で 0.316 倍に縮小されている。こうして求めた波長 のエネルギーを検出器の 1 ピクセルの大きさ(18 μ m × 18 μ m)で割ることによって、マスクから 1 ピクセルに 1 秒あたりに入射する光子数Nmaskが求まる。この光子数Nmaskは、マスクの温度T[K]によって変化する。結果は図 31 に示す。

$$N_{\text{mask}} = \frac{B_{\lambda}\varepsilon}{\frac{hc}{\lambda_0}} \times \frac{\pi}{4F^2} \times \Delta\lambda_{\text{band}} \times A_{\text{mask}} \times \frac{1}{\frac{A_{\text{mask}} \times x}{(18 \times 10^{-6})^2}}$$
$$= \frac{B_{\lambda}\varepsilon}{\frac{hc}{\lambda}} \times \frac{\pi}{4F^2} \times \Delta\lambda_{\text{band}} \times \frac{1}{x} \times (18 \times 10^{-6})^2 \quad \text{[photons/s/pix]}$$

3-4-3 望遠鏡からの輻射

次に、望遠鏡の副鏡からの熱輻射を求める。望遠鏡からの輻射がノイズとして効くとは考え にくいが、比較・確認のために見積った。MOIRCS ではコールドストップを置くため、その外 側からの輻射は入ってこないと考え、副鏡からの輻射だけを考える。



副鏡が温度T[K]で平衡状態にあるとする。波長 [µm]の放射エネルギーをS [W/m²/µm/sr]、 副鏡の面積をA_{M2}[m²]、副鏡の放射率を 、副鏡の一点がスリットを見込む立体角を [sr](ス リットの実面積をA_{sit}[m²]、副鏡とスリットの距離をD[m]として、 = A_{sit}/D²を用いる)とす ると、副鏡のある点からスリットに入る光子数Nは、

$$N = \frac{S_{\lambda} \times \varepsilon}{hc_{\lambda}} \times \Delta\Omega \times \Delta\lambda \times A_{M2} \qquad [photons/s /pix]$$

ここで、 =0.01(すばる赤外副鏡のコーティングは銀) D=15.652 [m]、A_{M2}は副鏡の口径を =1.265[m]として求め、副鏡の温度はT=273[K]とした。

これを検出器上でのスペクトル像に対応するピクセル数で割ると1ピクセルあたりに入射する 光子数が求まる。ここで、検出器上のスペクトルの広がりは以下のように求める。分光された

は、分解能Rを用いて = $_{0}$ /Rで決まる。この がN_{sit}ピクセルにおちるような光学 系の場合、1 ピクセルにおちる波長幅は / N_{sit}[μ m/pix]となる。ここではN_{sit}は 2[pix]とした。 一つのスペクトルはバンドの波長幅 $_{band}$ 分広がるから、バンド幅が占める波長方向のピクセ ル数N_{band}は、以下のように表せる。

$$N_{band} = \frac{\Delta \lambda_{band}}{\Delta \lambda / N_{Slit}}$$

ー方、スリットの空間方向のピクセル数は、視野をサンプリングレートで割ったものとなる。 こうして求めたスペクトルがおちるピクセル数は、Jバンドで約 67000pix、Hバンドで約 93000pix、Kバンドで約 70000pixとなった。副鏡から出てスリットを通った光子数Nをスペク トルがおちるピクセル数で割ると、1 ピクセルあたりに入射する光子数N_{M2}が求まる。

	Jバンド	H バンド	Kバンド
副鏡からの光子数	1.32×10^{-8}	1.01×10^{-4}	1.76×10^{-1}
N _{M2} [photons/s/pix]	1.52 × 10	1.01 × 10	1.70×10

表 6 副鏡からの光子数

3-4-4 装置から検出器へ入る熱輻射

次に、フィルタ以下検出器側の全ての部分からの熱輻射による光子数を見積もる。検出器は 0.8~2.5µm に感度を持つので、この波長域にわたってスリットマスクからの放射と同じよう に計算する。ただし、1 ピクセルの見込む立体角は 2 とする。検出器 HAWAII-2 の最適駆動 温度は約 80K なので、検出器とその周辺は全て 80K に冷却されるとする。

$$N_{d} = S_{\lambda} \times \Delta \Omega \times \varepsilon \times A_{pix}$$

= $4 \pi c \varepsilon A_{pix} \int_{0.8 \mu m}^{2.5 \mu m} \frac{\lambda^{-4}}{exp (hc/k \lambda T) - 1} d\lambda$
= 5.06×10^{-17} [photons/s /pix]

この輻射による影響は他の熱輻射に比べて十分小さいことがわかる。同様に、フィルタより望 遠鏡側にある光学マウントなどからの輻射も、80K 程度まで冷却すればノイズとしての影響は 十分小さくなるとして無視する。

マスクの温度による光子数の変化と、スカイの輻射によるノイズを図 31 にまとめた。



図 31 マスクの温度による光子数の変化とスカイからの光子数

積分時間と各種のノイズ量の変化をまとめると、図 32 のようになる。Readout(100)は、100 回露出を行ったときのリードアウトノイズを意味する。HAWAII-2 のリードアウトノイズは10 e⁻(カタログ値)だが、それを含めた読み出し回路のリードアウトノイズを20 e⁻とした。こ れは読み出し駆動系の目標値でもある。最も輻射の影響を受けるのはKバンドである。スカイ からの輻射に比べてスリットマスクからの輻射を10分の1以下に抑えるためには、1秒積分の ときでスリットマスクを227K以下に冷却すればよいことになる。



図 32 時間による各ノイズ量の変化

3-4-5 冷却温度のムラとふらつき

最後に、スリットマスクの冷却温度ムラやふらつきはどの程度まで許されるかについて見積 もる。ここで、温度のムラとは、ある瞬間に一枚のマスク内にある温度勾配のことを指し、温 度のふらつきとは、マスクのある点の温度の時間による変動を指している。 考えるポイントは、「各ピクセルに入射するマスクからの光子数について、1枚目のフレーム から最後のフレームまでのそれぞれが±1ADUに相当する温度(に相当する光子数)しか変動 しなければ、各フレームのマスクからの光子数は同じと言えて、マスクのみの(天体の映って いない)画像を差し引くことによって、温度のムラは問題でなくなる。」ということである。つ まりスリットマスクに多少の温度ムラがあっても、そのムラ具合をある精度で維持していれば 問題なし、ということになる。

輻射の効果はKバンドが一番大きいので、ここではKバンドのみを考える。また、実際のゲインはまだ決まっていないので、一般的な値として1ADU=5e⁻とした。

例えば、3000 秒の積分(1枚のフレームで 500 秒露出×6 フレーム)を行ったとする。この とき、スカイから1 ピクセルに入射する波長 2.2 µm の光子数は 6.39 [photons/s/pix]で、マス クからの輻射をこの 10 分の1 以下、つまり 0.64 [photons/s/pix]に抑えるのに必要なマスクの 冷却温度は 210.8[K]となる。各フレーム間で、マスクからの平均の光子数の変化が±1ADU 以 下ならば温度変化として認識されない。この光子数を温度に換算すると、 T= +0.99/-1.15 [K]となる。つまり 500 秒積分のとき、マスクの温度を 210.8K±約 1K の精度で維持できれば よいのである。マスクからの光子数はマスクの温度に比例するので、問題なのは温度勾配では なく、勾配の分布形状と温度レベルの変化である。

これらは、マスクの冷却設定温度、観測する天体の光度、積分時間、ゲインの設定などによっても変わってくるが、想定される状況での上限値を確認した上で、冷却方法や温度の維持方法などをさらに検討する必要がある。

3-5 スリットマスクの材質

はじめに熱的性質について。マスクが冷却されると、その材質の熱収縮係数 (coefficient of thermal expansion/contraction)、温度差、もとの長さに比例した収縮がおこる。

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{X}' - \mathbf{X} = \alpha \left(\mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1 \right) \mathbf{X}$$

ここで T_1 ははじめの温度、 T_2 は冷却後の温度($T_1 > T_2$)、Xはもとの長さ、X[×] は収縮後の 長さとする。このとき、マスクのどこか2点以上を固定していると、収縮が妨げられてマスク 内部に応力(stress)が生じる。これを熱応力という。この収縮によって生じる熱応力は、ヤ ング率、熱膨張係数、温度差に比例し、もとの長さや位置には依らない。また変形した長さの もとの長さに対する割合をひずみ という。マスクに生じる応力が材質によって決まるある許 容応力を超えると、マスクを常温に戻しても変形が戻らなかったり、亀裂が入ったり(破損) する。

$$\sigma = \mathrm{E}\alpha(\mathrm{T}_2 - \mathrm{T}_1) = \mathrm{E}\varepsilon$$

Eはヤング率(縦弾性係数)といい、生じた応力(引張/圧縮応力)とそれによって生じたひずみ(縦ひずみ)の比で、材料のひずみにくさを示すものである。Eが大きいほど、同じ応力がかかったときのひずみが小さい。

マルチスリットは、ひとつのマスクに複数のスリットをあけるが、それぞれのスリットの位 置は、天球上での星の位置に相当し、スリット間の距離などは露出のあいだ、精度良く保たれ ていなければならない。しかし実際には冷却した際にマスク自体が収縮することは避けられな い。つまり、マスクの固定の仕方やスリットの数によって、スリットの位置や大きさの微妙な ずれが生じる。このずれをスリットの加工精度の公差程度(約10µm)におさまるような材質 を選ぶ。ここでは、熱収縮係数が小さく、ヤング率の大きい材質が良いということになる。マ スクの固定方法にも工夫を要するが、これについては後で述べる。さらにマスクの材質は、冷 却の際にマスク全体にわたって素早く、温度ムラが小さく、十分に冷却できるもの、つまり熱 伝導率が高いこともポイントとなる。熱伝導率が高ければ、天体やスカイからの熱の流入があ った場合でもすぐに熱が拡散して温度ムラができにくい。

また、マスク面全体が光軸に対して垂直な平面精度を保てることが大事である。加えて、非 常に微小で精密なスリット加工が施せるような適当な硬さと加工性が求められる。そして当然 ながら光が透過しないものである必要がある。マスクの望遠鏡側はできるだけ輻射熱が流入し ないよう、反射率を高くする鏡面加工、検出器側は光学系による迷光を抑えるために反射率を 下げる加工が可能であることも必要である。以下表7に、候補に挙がった材料の一部を挙げる。

ここに挙げたものは、それぞれ特色がある。アルミは熱伝導性・加工性に優れ、OFHC(銅の 合金)は熱伝導性に最も優れるが加工性が悪く、アルミナはヤング率が大きいが熱伝導が悪い、 インバーは非常に小さい線熱膨張係数と高いヤング率という意味では最も適材だが熱伝導率が 悪い。カーボンファイバ、CFRP、グラファイトは金属ではないいわゆる新素材で、線熱膨張 率が小さい一方で熱伝導率が悪い。炭素鋼は非常に硬い鋼材で加工精度がだせるため、IRCS などの固定スリットの材質として使われている。

村西	密度	ヤング率	線熱膨張率	熱伝導率	比熱	参考温度
忉貝	[kg/m ²]	[Pa]	[×10 ⁻⁶ /K]	[W/m/K]	[J/kg/K]	[K]
AI7075	2.80e+3	70.7e+9	15.9	90	600	150
OFHC	8.94e+3	117e+9	16.7	392	385	150
Alumina	4.0e+3	380e+9	8.0	25	900	常温
Invar36	8.05e+3	147e+9	0.1	13.8	502	150
Carbon Fiber	1.4e+3	15e+9	0.1	6	-	常温
CFRP	1.6e+3	-	- 0.7	50	-	常温
グラファイト	1.0e+3	-	0.93/32	800/5	-	常温
炭素鋼	7.8e+3	200e+9	12	45.4	461	常温

表7 各種材料の物理的物性値、熱的物性値

3-6 スリット位置の決定

スリット位置は、あらかじめ取得した撮像データから目的の天体やガイド星の選定を行い、 これらの天体の、分光観測時のカセグレン焦点面上での位置を測定してスリットパターンを作 成する。おそらく、画像ファイルから CAD データを作成して加工機に指示を送ることになる。 こういった処理は、すべて計算機上で行われるが、これは望遠鏡や装置の各種のハードウェア パラメータと深く関与する。一連のマスク製作工程の一部としてソフトなどを標準に装備する。 この製作過程では、天体位置の決定誤差、MOIRCS 光学系の歪曲、望遠鏡や MOIRCS 自身 のたわみ、温度変化による熱収縮(熱膨張)、マスク加工機の精度など様々な要因によるスリッ

ト位置の決定誤差を考慮しなければならない。これらがほとんど位置決定精度に影響しない程

度 (> 0.01mm) に MOIRCS 全体を設計していく必要がある。



3-7 スリットの加工

スリットの形状は、マウナケア山頂でシーイングの良い時の 0.2 を想定して幅 0.1mm、長 さは天体に依るが数秒に相当する 1~10mm の矩形を考える。スリットの位置精度は視野にし て 0.02 に相当する 0.01mm、スリットの加工面の面精度はスリット幅の 10 分の 1 程度(約 10µm)とする。これは、すばるのポインティング精度からくる制限である。実際、すばるの ポインティング精度は非常に高く、2mm を 0.01mm 程度のきざみで動かすことが可能となっ ているので、スリットはそれと同等かそれ以上の精度で加工・設置する。スリットは上から見 たときにできるだけ長方形であることが好ましいが、加工方法によっては角が多少丸くなるの は仕方がないとする。断面の形状は角錐にして、エッジを持たせることでスリットを通る際の 光の乱反射を防ぐ。この角度は 60°程度とする。



加工方法は主に放電加工(EDM: Electric Discharge Machining)を考えている。材質の選択に よってはすばるの FOCAS で用いられているレーザ加工も考える。他の加工法としては、フラ イス加工、エッチング加工、ウォータージェット加工などがあるが、精度が見込めないことが わかったので考慮しない。



図 33 放電加工の原理

放電加工とは、加工する金属と電極の間に 1000 分の 1 秒から 100 万分の 1 秒のパルス放電 を発生させ、金属原子を吹き飛ばして加工する非接触加工で、最も精度がだしやすい。金属の 硬度に制約されないが、電気伝導度の極端に低い材質(カーボンファイバーシートなど)は加 工ができない。また金属板の材質・厚みなどによっては、電極の磨耗が激しく安定した精度が 得られるかどうかが問題となる。ランニングコストもかかる。一方のレーザ加工で金属のマス クを加工するには、大きな出力を安定して得ることのできる YAG レーザが適当で、薄い金属 板なら精度もだせる。ただし、レーザの出力に比例して加工機の値段も非常に高くなる。他に も、加工機を山頂に置くためには、冷却水や気圧の問題などで大きく制約がかかる。マスクの 材質選択と加工方法の関係が重要になるので、これらの選定は同時にすすめており、現在は数 社とのコンタクトをとっている。

さらに、マスク製作の工程で、いつどのように表面加工をするかは決めていないが、できる だけ簡潔な方法を考えていく。ただし、反射率を抑える加工として一般的に使われているアル マイト加工をした面は、電気伝導度が大きく変化する(悪くなる)ことなどにも注意する。

さらにマスク加工機については、マウナケア山頂という運用環境条件(標高 4200m、気温 -10~20)に適した仕様、運用に際して人体に損傷のないような一連のシステムを装備し、ユ ーザが特殊な訓練を受けなくても使用できるようなマニュアル、インターフェースなどの構築 も考えていく。

4 解析と実験

4-1 スリットマスクの冷却解析(数値実験)

これまで挙げた、天文学的・技術的に要求されることを考慮しながら、スリットの材質と加 工方法を詳細に検討していく。まずは、いくつかの材質をとりあげて、冷却したときに必要な 精度を満たすかどうか、冷却解析を行って調べる。この数値実験には有限要素法を用いる。

4-1-1 有限要素法

有限要素法は、無限の自由度を持つ連続体をその特性を損なわないように有限の自由度を持 つ有限個の要素の集合体として近似して、この集合体に対して成立する方程式を解く数値解析 法である。つまり、部分ごとのモデルをつないで全体のモデルの動向を知るという方法である。



図 34 有限要素法

有限要素解析では、解析する領域をいくつかの要素に分割し、ひとつひとつの要素について 非定常熱伝導方程式を解いて熱の伝導の様子(冷却時間など)を知るとともに、その結果生じ る温度分布を元に、ひとつひとつの要素について弾性(熱応力)解析を行い、温度変化による 各部の変形の様子を知る。有限要素法はどんな形状の物体にも適用できるという利点があり、 熱応力などの材料力学分野でよく用いられている。今回、解析には FEMLEEG という有限要素 解析ソフト(ホクトシステム社)を用いた。以下、熱伝導解析とそれに連動した熱応力解析に ついて簡単にまとめるが、解析ソフトを用いる場合、有限要素法の計算の流れはある程度ブラ ックボックスとして扱うことができる。

4-1-2 冷却時間の見積もり(非定常熱伝導解析)

まずはスリットマスクの冷却時間を見積もる。冷却される物体の温度は時間的に変化する。 このような問題は、初期条件・境界条件のもとに非定常熱伝導方程式を解いていくことになる。 具体的な手順は、マスクをいくつかの要素に分割し、各要素の頂点を温度の計算点として、 各要素内で熱伝導方程式が最もよく成り立つように温度の満たすべき条件を定め、変分原理で 温度を定式化する。こうして温度に関する連立方程式を得て、これを解いて数値解を得る。



等方的な物質(今の場合、熱伝導率が材質の各軸において等しい)における非定常熱伝導方 程式は、

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \overset{\bullet}{Q}$$
(4.1)

と書ける。ここで、*T*=*T*(*x*, *y*, *z*, *t*)は温度で、空間と時間の関数である。 は密度、c は比熱、 は熱伝導係数、Q は単位時間・単位体積あたりの発熱量である。これを、ガラーキン法を用いて各要素について方程式をたてて離散化し、有限要素式に変換する(具体的な方法は省く)。

$$[K]{\Phi} + [C]\left\{\frac{\partial \Phi}{\partial t}\right\} = \{F\}$$
(4.2)

と表せる。ここで、{ }は全体の節点温度ベクトル、[K]は熱伝導マトリクス、[C]は熱容量マト リクス、{F}は熱流束ベクトルと呼ばれる。この式は空間に対しては離散化されているが、時間 に関しては離散化されていない。時間に関する離散化にはクランク・ニコルソン差分式を用い る。時刻t+ t/2(tは微小時間増分)における節点温度ベクトルを

$$\left\{\Phi\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)\right\} = \frac{1}{2}\left(\left\{\Phi(t+\Delta t)\right\} + \left\{\Phi(t)\right\}\right)$$
(4.3)

また、同時刻における節点温度ベクトルの時間微分を

$$\left\{\frac{\partial\Phi}{\partial t}\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)\right\} = \frac{\left\{\Phi(t+\Delta t)\right\} - \left\{\Phi(t)\right\}}{\Delta t}$$
(4.4)

と表す。これらを式(4.2)に代入すると、

$$[K]\left\{\frac{1}{2}(\{\Phi(t+\Delta t)\}+\{\Phi(t)\})\right\}+[C]\left\{\frac{1}{\Delta t}(\{\Phi(t+\Delta t)\}-\{\Phi(t)\})\right\}=\{F\} \quad (4.5)$$

つまり、

$$\left(\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C]\right) \left\{\Phi(t + \Delta t)\right\} = \left(-\frac{1}{2}[K] + \frac{1}{\Delta t}[C]\right) \left\{\Phi(t)\right\} + \left\{F\right\}$$
(4.6)

となる。式(4.6)右辺の{ (t)}は既知であるとして、非定常熱伝導問題の有限要素式はこの式(4.6) を用い、時間の経過に従って逐次解くことができる。

既成の有限要素解析ソフトを使う場合には、まずは解析する物体をモデル化し、それを要素 に分割してから境界条件を与える。ここで行うマスクの冷却における熱伝導解析では、拘束条 件、固定温度、初期温度を与える。各要素には、物理的物性値として密度[kg/m³]、熱的物性値 として線熱膨張係数[/K]、熱伝導率[W/m/K]、比熱[J/kg/K]を与える。

また、一般的に熱伝導率、熱膨張係数、熱容量(比熱×密度)[J/m³/K]などの物性値は温度依存性がある。ここでは[K]、[C]は温度の関数であり、厳密には式(4.6)の解析する各時間ステップにおいてその値を修正して節点温度がある温度に収束するまで繰り返し計算を行うべきだが、計算に大変時間がかかるので、低温での物性値を用いて、式(4.6)を1回解くだけにした。また低温のデータが入手できなかった材質については、常温での値を用いている。これによる本当の物性値からのずれがあると、その物性値が温度とともにどういう割合で変化しているかによって結果を過大もしくは過小評価することになるが、そもそも低温での物性値のデータが少なく精度が良くないため、あくまで参考値として考慮するにとどめる。

拘束条件については、解析モデルの連続性・対称性から矛盾のないような拘束をする(自由 度を与えない)。例えば下の図 35 のように、回転対称体の一部を切り取ってモデル化した場合 は、マスク面の 方向、マスクの中心の r 方向、マスクの縁の z 方向の境界面をそれぞれ拘束 する。冷却解析において発生した熱応力によって各要素は自由度のある方に集中して逃げよう とするので、この拘束を間違えると、一部が極端に変形したりすることがある。

初期温度は、変位や応力がゼロの基準温度(一種の荷重条件)として与える。冷却の際は周 囲が十分真空になっているとして、熱流束はないとした。また輻射による熱流入もないとした。



図 35 解析対象のモデル化

実際の解析は、スリットマスクの形状と温度分布の対称性を利用し、マスクの一部だけをと りだして非定常熱伝導解析を行った。マスクの直径は200mm、厚みは0.1mm。材質は、熱膨 張係数が大きいのが難だが熱伝導率の良いアルミ(AI7075)と、物理的特性では冷却マスクに最 適だが熱伝導率が非常に低いインバー(Invar36)について低温での物性値(150-200K)を用いた。 境界条件として円周にそって飛び飛びに8か所を200Kに冷却した状態を仮定した。スカイか らの輻射の影響は無視した。実際、反射率の高いアルミは、輻射熱の吸収率が低いため、熱源 としてはほとんど効かないことを予め計算で確認してある。常温からマスクのまんなかが200K になるまでの時間は、アルミでは約100秒、インバーでは約1.7時間であった。インバーは桁 違いに冷却に時間がかかることがわかる。



8か所を冷却

		アルミ(AI7075)	インバー (Invar36)
293K	200K	100 秒	6×10 ³ 秒(約1.7 時間)
293K	150K	390 秒	10 ⁴ 秒(約3時間)

表 8 材質による冷却時間



図 36 冷却時間の見積もり(アルミ(左) インバー(右))

実際には、マスクストッカの中にはほかにもマスクが多数入っていること、熱浴となるパーツ がたくさんあることなどから、マスクストッカ内のものを全て冷却するにはこの数倍の時間が 必要になると思われる。

4-1-3 冷却による変形量の見積もり(静弾性熱応力解析)

次に冷却によるスリットの変形の見積りを行う。

スリットマスクは冷却したとき収縮するが、どこも固定していなければ自由に収縮する。この時、熱収縮による応力は生じないが、スリットどうしの相対的な位置は不確定に変化する。 一方で、マスクの縁が固定されている場合は、そこを固定点としてマスクは縁へ向かって収縮 するため、マスク内部には引っ張られた力に逆らう方向に引張応力がかかる。マスクにスリッ ト穴があいていると穴の周辺部はこの熱収縮と熱応力の力の兼ね合いによって変形する。先に 述べたように、この変形量を10µm程度に抑えなければならない。



熱収縮と熱応力による変形量の見積もりには、熱応力解析を用いる。熱応力解析では、常温 から 200K まで完全に冷却したときの温度分布に基づいて解析を行う。マスクは周辺が固定さ れており、初期温度との温度差によって生じた変位量に比例した応力分布が与えられる。

固定している材質に熱応力がかかると材質の各点は移動する。元の長さに対する移動量をひずみ()という。応力とひずみの関係は、フックの法則より

$$\sigma = E\varepsilon = E\alpha(T_1 - T_2) \tag{4.7}$$

と書ける。これに有限要素法を適用するためにマトリックス化すると、

$$\{F\} = [K]\{u\}$$
(4.8)

となる。ここで{F}は与えられた応力ベクトル、[K]は形状と材質によって決まる剛性マトリクス、 {u}は位置のベクトルである。これを解いていくと、ある節点の位置ベクトルの変位量が求まる。

これを有限要素法ソフトで解析するためには、熱伝導解析のときと同じように、まずは解析 する物体をモデル化し、それを要素に分割してから境界条件を与える。ここでは、はじめに冷 却(非定常熱伝導解析)を行い、その節点温度データを元に熱応力解析にかけるという2段階 をふむ。今度は、各要素に物理的物性値として密度[kg/m³]、ヤング率[Pa]、ポアソン比、熱的 物性値として線熱膨張係数[/K]、熱伝導率[W/m/K]、比熱[J/kg/K]を与える。

マスクの材質のところで挙げた各材質について静弾性熱応力解析を行った結果、(1)マスク 周辺を固定しない場合は、マスクは自由に収縮し、スリットは変形せず、応力も生じなかった。 一方、(2)マスク周辺を全部固定した場合は、スリットは変形し、スリットの角に応力が集中 した。マスク周辺を固定したときの解析結果が図 37 である。それぞれ合成変位とミーゼス応 力の分布の濃淡図を示している。合成変位は、ここではマスクの3方向成分それぞれの変位量 を合成したものを示している。青いところは変位がほとんどなく、緑、黄、赤の順に変位量が 大きくなる。応力については、以下の式で表されるミーゼス応力分布を表している。

$$\sigma_{\rm M} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = - ゼス応力$$
(4.9)

青い部分はほとんど応力がかからず、赤になるほど強い応力がかかっている。各材質について、 許容応力を超えて力がかかっているものはなかった(これを超えると常温に戻っても形が戻ら ないような変形がおこる)。 どちらの濃淡図も材質間でスケールを合わせてある。

マスクの材質選択の表7と合わせて見比べると、熱膨張係数の大きなアルミや銅では、冷却 による変位量が大きい。またヤング率の小さい材質では、生じる応力が大きくなっている。特 にスリットの角の部分に応力が集中しているのがわかる。変位は、冷却収縮による移動とそれ を妨げる向きにはたらく熱応力の合成で決まる。この結果、スリットは樽のような形になる。



	スリット幅 (視野)	スリット長 (視野)
アルミ(AI7075)	+ 33.65 µ m (0.07")	- 12.64 µ m (0.03")
銅(CFHO)	+ 30.80 µ m (0.06")	- 6.80 µ m (0.01")
アルミナ(Alumina)	+ 12.46 µ m (0.02")	- 4.68 µ m (0.009")
インバー(Invar36)	+ 2.26 µ m (0.005")	- 5.90 µ m (0.01")
カーボンファイバ	+ 21.80 µ m (0.04")	- 4.10 µ m (0.008")

表 9 冷却によるスリットの変形量



図 37 冷却解析の結果

4-1-4 冷却解析のまとめ

冷却解析の結果からは、アルミとインバーが候補として挙げられる。しかし、材質によって 一長一短があることもわかった。アルミは冷却時間が短いという点では理想的だが、変形量が 非常に大きい。インバーは変形量が極めて少ないという点で理想的だが、冷却時間が非常にか かる。他の金属・非金属材質などは、特に適していると言える点がなく、加工方法、加工性、 冷却時間、冷却変形、強度等の兼ね合いで適した材質と言えるものはなかった。また今回の熱 応力解析で用いたモデルは、1枚のマスクに、想定している最も多いスリット数(50本)を切 って、なおかつマスクの縁全体をきっちりと固定するという、かなり厳しい仮定をおいている ため、実際の変位量はこれより小さくなると考えている。スリットの変形量はスリットの数や その位置に依るので、実際に実験を行って試行錯誤しながら検討する必要がある。

4-2 スリットマスクの冷却実験

アルミ薄板のサンプル加工を M 社に依頼した。加工されたマスクの顕微鏡写真が図 38 であ る。厚み 0.025mm と 0.075mm のアルミ薄板に、幅 0.1mm、長さ 1.0mm のスリットを加工し た(ちなみに、家庭用キッチンホイルは厚み 0.015mm である)。100 本のスリットを加工した ときの加工精度は、厚み 0.025mm が幅 0.100 + 0.003mm、長さ 1.000 + 0.006mm。厚み 0.075mm が幅 0.100 - 0.006mm、長さ 1.000 + 0.001mm となった(M 社の検査による)。見た感じでは、 バリなども問題なさそうである。電極の消耗補正や移動時間を含めて、100 本のスリットの加 工に要した総加工時間は、板厚 0.025mm が 110 分、板厚 0.075mm が 141 分だった。実際に はマスクー枚に数~数十本のスリットを切るので、マスク 1 枚の加工に約 1 時間が目標である。



図 38 スリットサンプル加工(M社) 左が板厚 0.025mm、右が板厚 0.075mm

材質	アルミ
板厚	0.025 / 0.075 [mm]
スリットサイズ	0.10 × 1.0 [mm]
電極材質	タングステン
加工時間	88 ~ 119 min / 100 slit
加工精度	±約0.006mm

表 10 スリットサンプル加工の結果(M社の放電加工機)

前節のモデル計算ではスリットは等間隔に並んでいると仮定したが、実際のスリットの位置 は天体の位置に合わせてランダムであり、スリットマスクを冷却したときの実際のスリットの 変形量や位置の変位はモデル計算の結果とは異なると予想される。現実の場合と同じように材 質を用意しスリット加工をして、冷却し、その変化が許容範囲内であることを確認する必要が ある。スリットの工作・変形はマスク前面にわたって約10µmの精度が要求されるため、その 程度の精度を測定できるような実験システムを新たに設計・製作する。時間と費用を要する真 空冷却系の実験のため、予め実験方法をある程度吟味し、確定しておく必要もある。

外からスリットのほぼ前面が見渡せるようなウィンドウのあるデュワーをつくり、そこにデジカメを取りつけた実体顕微鏡を固定して、ウィンドウ越しに冷却の様子を観察する。ただし、ウィンドウが大きいため、外部からの輻射の影響が大きいことも考慮し、できるだけラジエーションシールドのような熱遮断機構を置かないと、安定した温度制御ができない。おおまかには図 39 のようになる。



図 39 実験用真空・冷却装置でのスリットの冷却実験

4-3 スリットマスク交換機構の駆動実験

スリットマスク交換機構は、本体デュワーの製作に先立って独立に製作し、駆動試験を行い、 現在考案している機構での駆動精度を確認する。現在は、スリットマスク交換器部分のデュワ ーの製作に入っている。各部位の各動作に必要となる制御要素とその精度を実験で確認する必 要のある項目を挙げる。

- ▶ ゲートバルブを確実に開け閉めする
- マスクストッカの軸の回転を精度良く行う
- ▶ マスクストッカから任意のマスクを取り出す、差し込む
- ▶ マスクを焦点面に運ぶ、焦点面から外す
- ▶ マスクを焦点面でマスクホルダに固定、解除する
- 焦点面位置決め精度の測定
- ▶ スリット加工の繰り返し精度の測定
- ▶ ガイド星の検出とガイドの方法
- ▶ 撮像データと比べたずれの量(x、 y、)を検出し、

マスクの回転・併進、または望遠鏡のポインティング

5 まとめと今後の展開

5-1 まとめ

すばる望遠鏡カセグレン・近赤外多天体分光装置 MOIRCS の開発に伴い、世界でまだ例を 見ないKバンドまで分光可能な「冷却マルチスリット」交換機構の基本設計を行った。マルチ スリットマスクの冷却にあたり、冷却シミュレーションを行って、その実現性を検討し、材質 や機構などを絞り込んだ。また、これらの駆動実験のための製作・準備をすすめている。

5-2 そのほか

冷却マルチスリット交換機構については、真空・冷却空間でのマスクの交換が一番の課題だった。冷却空間中の駆動機構はまず非常に面倒なことが多く、しかも各機構のサイズが大きく、かつ精度が要求されるのでさらに難しい。しかし、既存の技術でやればできないことではなかったので、とにかくシンプルな機構になることを心がけて思いつく案を出し合った。観測装置全般に経験豊かな西村氏と、すばる装置を数多く手がけてきた小俣氏と土井氏、メカの得意なKerry 氏らと、とめどもなくアイデアを出し合って現在の構想ができた。Kerry 氏が次々と描く図面を見ながらさらに詳細な検討が続いている。また、この機構のヒントとなったのは、超高真空・超低温中で精度よく試料を交換して光電子などの物性実験を行っている、高エネルギー研究所の斎藤智彦氏のアドバイスだった。アイデアが形になってきた頃、他のライバル装置を見てみると、この近赤外多天体分光装置はバラエティと工夫に富んだ装置が多いことに気づいた。Kバンドでの分光観測は、天文学的にも技術的にもこれからの展開がおもしろそうである。

5-3 今後の課題

今後は、第3、4章で述べた冷却マルチスリット交換機構の設計が本当に実現可能かどうか を、まずは試作器を製作し、実験によって確認することが最重要課題である。

まずは 2001 年春頃までに、スリットマスクの冷却実験を行う。これにはハワイ観測所の CIAO の試験デュワーを借用する。MOIRCS 用の試験デュワーの設計・製作も同時にすすめ、 いずれ実験はそちらに移行する。スリット交換部分のデュワーを試作し、直線導入器、冷凍機 などのパーツを揃えて、夏頃には冷却マルチスリット交換機構の真空・冷却実験を行う。駆動 制御などもまだ具体的に考えていないので、これから検討する必要がある。スリット加工機の 選定も同時に進め、マスク材質を決定する。各制御用ソフトウエアも同時に開発を進める。

2002年以降に予定している全体的な駆動制御、ソフトの整備、光学アラインメントなどの実験については、具体的な方法を勉強し、工夫して、予め準備する必要があるだろう。現時点では知らないことばかりで見当がつかない。

また実験以外にも、実際の多天体分光モードでの観測方法について詳細な検討が必要になってくる。例えば、多天体分光時の波長感度補正の方法や、スカイフラットの取得方法、ガイド 星の検出とガイドの方法なども具体的に検討していかなければならない。

5-4 今後の開発計画

今後の開発計画は、2001年前半で、マルチスリット交換機構のパーツの加工や必要部品を購入して組み上げを行い、2001年末までに真空・冷却しての交換機構の駆動試験、動作精度の確認実験を行う。2002年以降については本体デュワーの設計・加工を進める。

光学系については、光学素子の発注、オプティカルチューブ・オプティカルマウントの設計 を 2001 年前半までに、光学部品の加工と納入された光学素子の性能評価を年内に行い、でき ればオプティカルチューブでのアラインメント調整まで行いたい。2002 年以降は、本体デュワ ーへの組み込みと真空・冷却実験を中心に行う。MOIRCS のファーストライトは、2003 年初 頭を目指す。

サイエンステーマについては、MOIRCS サイエンスグループを結成し、具体的な観測計画などの議論をすすめる。

参考文献

- [1] 岡村定矩『銀河系と銀河宇宙』(東京大学出版会、1999)
- [2] 伊藤信成『木曾シュミット望遠鏡用赤外線カメラの開発』(修論、東京大, 1994)
- [3] 児玉忠恭 (FMOS W.S. 収録、1999)
- [4] 庄司正弘『伝熱工学』(東京大学出版会、1995)
- [5] 鈴木竜二『近赤外多天体分光装置の光学設計』(修論、東北大、2001)
- [6] 国立天文台 FOCAS 開発グループ『微光天体分光撮像装置製作実施計画書』(1996)
- [7] 長嶋千恵『近赤外3色同時サーベイ用カメラ SIRIUS の開発』(修論、名古屋大, 1999)
- [8] 本原顕太郎『すばる OHS 用冷却赤外分光カメラ CISCO の開発』(修論、京都大, 1997)
- [9] 矢川元基『流れと熱伝導の有限要素法入門』(倍封緘、1983)
- [10] 山田義昭『はじめて学ぶ材料力学』(技術評論社、1978)
- [11] A.T.Tokunaga et al. 1998, SPIE, Vol.3354, 512
- [12] Charles C. Steidel et al. 1998, ApJ, 492, 428
- [13] Charles C. Steidel et al. 1999, ApJ, 519, 1
- [14] D.E.Blackwell et al. 1983, M.N.R.A.S., 205, 897
- [15] Gerhardt R. Meurer et al. 1999, ApJ, 521, 64
- [16] Ian S. McLean 1997, "Electronic Imaging In Astronomy", WILEY
- [17] James Bell et al. 1998, SPIE, Vol.3354, 1103
- [18] M. Balcells et al. 2000, SPIE, Vol.4008, 797
- [19] Max Pettini et al. 1998, ApJ, 508, 539
- [20] Naoto Kobayashi et al. 2000, SPIE, Vol.4008, 1056
- [21] Nobunari Kashikawa et al. 2000, SPIE, Vol.4008, 104
- [22] Paul R. Yoder, Jr. "Mounting Lenses In Optical Instruments"
- [23] Richard Elston 1998, SPIE, Vol.3354, 404
- [24] Robert C. Kennicutt 1998, Annu.Rev. A. A, 36, 189
- [25] Rose A. Finn and Donald W. McCarthy 2000, SPIE, Vol4008, 759
- [26] T. T. Young *et al.* 1998, SPIE Vol.3354, 317
- [27] Yamashita et al. 1993, PASP, 105, 940
- [28] 日本軽金属㈱ http://www.nikkeikin.co.jp/
- [29] CFHT http://www.cfht.hawaii.edu/
- [30] ESO http://www.eso.org/
- [31] EMIR http://www.iac.es/project/emir/
- [32] FLAMINGOS http://www.astro.ufl.edu/~elston/flamingos/flamingos.html
- [33] IFA http://www.ifa.hawaii.edu/
- [34] MDC http://www.mdc-vacuum.com/
- [35] Robohand Inc. http://www.robohand.com/

[36] Rockwell Science Center http://www.rsc.rockwell.com/

(ホームページアドレスは2001年2月現在のもの)