広島大学1.5m 望遠鏡移設地シーイング のモニター装置開発と測定

広島大学 理学部 物理科学科 高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室 千代延真吾

2005年02月10日

概 要

我々は国立天文台より移管された赤外シミュレータ (1.5m 可視近赤外線望遠鏡) を 主軸に据えた天文台を建設し、ガンマ線衛星 GLAST やX線衛星 Astro-E2 と連携し た高エネルギー天体の多波長観測研究を行う計画を推進しており、2006 年のファー ストライトに向け望遠鏡の移設や改造・観測準備を進めている。この計画の一環と して、今回独自にシーイングモニタ (DIMM)を開発した。シーイングの測定は天文 台建設時だけでなく、天文台建設後も安定した観測環境を維持するために欠かせな いものである。開発した DIMM は、低価格でかつ性能面においても信頼性のあるも のを目指した。比較試験のため岡山観測所に設置された DIMM と同時観測を行い、 結果、広島大学 DIMM は十分な性能をもつことを確認した。次にこの DIMM を用 いて、立木伐栽後の天文台サイト (標高 506m の山頂) でのシーイング調査を継続的 に行った。その結果、平均 1.2 ± 0.2 秒というシーイングサイズ値が得られた。これ は、国内一級のサイトといわれる岡山観測所と比較して遜色が無い値でもあり、本 天文台サイトが優れたシーイング環境下にあることが確認された。

目 次

第1章	序論	3
1.1	1.5m 望遠鏡移管計画と現状	3
	1.1.1 サイト予定地選別に関するシーイング調査	3
1.2	1.5m 望遠鏡 (赤外シミュレーター)	6
1.3	本研究の目的	7
第2章	シーイング	9
2.1	シーイングの重要性	9
2.2	地球大気の理論的扱い 1	10
	2.2.1 大気の擾乱とシーイング 1	10
	2.2.2 Kolmogorov 乱流と空間内の屈折率揺らぎ 1	10
2.3	DIMM	12
		0
弗3 卓		. 8
3.1		18
		18
	3.1.2 ワエッシ・フリスムとマスク	20
	3.1.3 撮像部	21
3.2	ソフトウェア	23
	3.2.1 OS: Fedora core 2 (kernel 2.6.9-FC2) $\ldots \ldots \ldots \ldots 2$	23
	3.2.2 画像取り込み: dvgrab version 1.5	23
	3.2.3 画像変換: transcode version $0.6.6$	24
	3.2.4 星像重心揺らぎ測定: seemon2 version 0.5.8-plus 2	25
	3.2.5 データ処理の流れ 2	25
3.3	京都 DIMM と同時試験観測2	27
	3.3.1 京都 DIMM	27
	3.3.2 同時試験観測	28
第4章	シーイング測定と考察 3	62
4.1	天文台建設予定地におけるシーイング測定	32

	4.1.1	11月24日	33
	4.1.2	12月6日	34
	4.1.3	12月9日	35
	4.1.4	12月13日	36
	4.1.5	1月12日	37
	4.1.6	1月17日	38
4.2	シーイ	ングと露光時間	40
	4.2.1	教育学部 DIMM	40
	4.2.2	教育学部 DIMM キャリブレーション	41
	4.2.3	露光時間変化を伴うシーイング観測	44
	4.2.4	観測による r ₀ 比と、モデル r ₀ 比の比較	46
	4.2.5	シ-イング測定における露光時間の許容範囲	52

第5章 まとめと今後の課題

 $\mathbf{54}$

第1章 序論

1.1 1.5m 望遠鏡移管計画と現状

国立天文台三鷹構内にある赤外シミュレーター (口径 1.5m 光学赤外線望遠鏡) が 2004 年に広島大学に移管され、2006 年に移設が予定されている。この赤外シミュ レーターは、国立天文台ハワイ観測所にある大型光学赤外線望遠鏡「すばる」で使 用する観測装置の開発・評価をする目的で国立天文台三鷹構内に建設されたもので あるが、すばるの第一期観測装置開発が全て終了したのち、シミュレーターとして の需要が減ってきていることも考慮され、本格的な天文・宇宙研究へ有効に活用す る計画を提案した広島大学へ移管されたという経緯がある。2003年に大学近郊にお いて行なわれたシーイング調査において、全国的に見てもトップレベルのシーイン グ環境を有したサイト(福成寺)が確認され、現在、福成寺周辺へと移設準備を進め ているところである。この赤外シミュレーターを用いた主な研究目的としては、ア ラート対応観測を行うことである。具体的には 2007 年に NASA から打ち上げられ るガンマ線衛星 GLAST 衛星などが天体を検出したときに発信するアラートから天 体の座標を取得し、可視光で追跡観測することを計画している。また、GLAST や 2005年に宇宙航空研究開発機構から打ち上げられる X 線衛星 Astro-E2 衛星と連携 することで同時多波長観測(可視~ガンマ線)を可能とし、宇宙における様々な現象 の研究における分野に貢献することも目的としている。

1.1.1 サイト予定地選別に関するシーイング調査

1.5m 望遠鏡が広島大学に移管されることが決まった後、移設候補地を決定する ためのシーイング調査が国立天文台岡山天体物理観測所および広島大学近郊におい て実施された (参考文献 [2])。シーイングとは、星の見え具合を定量的に示したも のであり、通常星像輝度分布の半値幅で示す (詳しくは2章で説明する)。以下にそ の結果を簡単に紹介する。シーイングの測定に使った機器は京都大学から借用した DIMM(Differential Image Motion Monitor) である。広島大学近郊での測定は2003 年8月6日から12月4日までの期間、場所は広島大学教育学部屋上、同理学部屋上、 板鍋山 (豊栄町)、福成寺 (東広島市)、保野山 (安芸津町) で行われた (図 1.1)。 岡山は歴史的にみてもシーイングや天候条件において国内トップクラスの観測所 として名を馳せている(参考文献[3])。岡山構内では、場所により若干の差は見られ るものの、平均1.2秒角という値が得られ、いずれの場所でもよい環境にあること が判明した(表1.1)。

一方、表1.2を見るとわかるように、福成寺近郊のシーイングは最良1秒角という値を出している。この値は、全国的に見てもトップレベルに値する。日による変化はあるものの、平均すると岡山と同程度のシーイング環境にあることが判明した。

ここまでが上田論文での結果である。その後の調査で、福成時周辺半径 300m 程度の範囲ではいずれも良いシーイング環境にあることがわかり、他の条件も考慮して天文台サイトが福成寺の東約 200m にある標高 506m の山頂に決定された。



図 1.1: 広島大学近郊でのシーイング測定値マップ

表 1.1: 岡山天体物理観測所でのシーイングデータ(上田修論より)

場所	測定日	Subarcsec の割合	中央值 (arcsec)	最頻値 (arcsec)
太陽クーデドーム	5月1日	28 %	1.2	1.0-1.05
移設候補地	5月2日	12 %	1.3	1.2-1.25
太陽クーデドーム	5月27日	49 %	1.0	0.7-0.75
太陽クーデドーム	5月28日	36 %	1.15	0.85-0.9
DIMM ドーム	5月29日	3.0 %	1.5	1.15-1.35
СТ 97–	7月31日	7.0 %	1.4	1.2-1.25
СТ 97–	8月1日	35 %	1.2	1.05-1.1
移設候補地	8月2日	20 %	1.3	1.25-1.3

表 1.2: 2003 年広島県の測定日ごとのシーイングデータ(上田修論より)

場所	測定日	Subarcsec の割合	中央值 (arcsec)	最頻値 (arcsec)
広島大学教育学部屋上	8月6日	2 %	2.05	1.6-1.65
広島大学理学部屋上	9月16日	3 %	2.1	1.35 - 1.4
	9月17日	1 %未満	2.5	2.0-2.05
板鍋山 (豊栄町)	9月26日	1 %未満	2.8	1.5-1.55
	10月8日	2 %	1.85	1.85-1.9
福成寺(東広島市)	12月1日	1 %未満	2.25	2.1 - 2.15
	12月3日	26 %	1.25	1.1-1.15
	12月8日	5 %	1.6	1.2-1.6
	12月10日	14 %	1.6	1.15-1.2
	12月14日	31 %	1.15	0.85-0.9
	12月16日	50 %	1.0	0.85-0.9
	12月17日	0 %	2.3	2.35 - 2.4
	12月24日	10 %	1.45	1.35 - 1.4
	12月25日	0 %	1.8	1.4-1.45
保野山 (安芸津町)	12月2日	2 %	1.65	1.45-1.5
	12月4日	3 %	2.1	1.8-1.85

1.2 1.5m 望遠鏡 (赤外シミュレーター)

1.5m 望遠鏡 (赤外シミュレーター) はすばる望遠鏡で使用される観測装置の実験 や、すばる望遠鏡立ち上げの予行演習の他に、赤外線や可視域における天体観測も 考慮して建設された口径 1.5m の反射望遠鏡である。

この1.5m 望遠鏡は10分間の露光時間の分光観測で約17等級、明るさを測定する 測光観測では約20等級の観測が可能である。この望遠鏡で狙う主なサイエンスは、 高エネルギー天体における物理過程の解明である。高エネルギー天体には、ガンマ 線バーストなどの急激な時間変動を示す突発天体と呼ばれるものがあり、可視光で もその様子を観測することができる場合がある。突発天体は、いつどこで起こるか わからないため、現象発生直後を観測することは難しい。広島大学では、1.5mとい う小ぶりな望遠鏡の長所を生かし、これら突発天体に特化した望遠鏡を目指す。架 台・駆動系は実績のある名古屋大学と協力して突発天体発生30秒以内の観測が可能 な機動性の獲得を目標にしている。



以下に1.5m望遠鏡の全体図、仕様を載せる。

図 1.2: 1.5m 望遠鏡 (赤外シミュレーター) 全体図

光学系	Ritchey-Chretien 光学系
主鏡	有効径 1500 mm
	主鏡の F比 F =2.0
焦点モード	カセグレン焦点 1 つ
	ナスミス焦点1つ
	合成 F 比 カセグレン、ナスミス共に F=12.2
	焦点距離 18,300mm
星像の分解能	1" FWHM
視野	$15'\phi$
最大駆動速度	1 °/sec 以上
最大加速度	0.5 °/sec ² 以上
架台の方式	経緯台方式

1.3本研究の目的

赤外シミュレーター移設地選定に際しての調査で、福成寺付近のシーイングが良 いということが2004年春までに判明していた。しかし、天文台建設予定地となった 場所はこれまで木々が密集しており、これまでは建設予定地でのシーイング調査が 行なわれていなかった。2004年10月に、ようやく周囲30m×30mの矩形範囲で伐 採が行われ、シーイング測定ができる環境になった。これまではシーイング調査の ために装置 (Differential Image Motion Monitor[DIMM])を京都大学から借用してき ていたが、天文台の立ち上げのために必要不可欠なものであり、現地での重点的な 測定を開始するのに際し、広島大学で独自に DIMM の開発を試みた。望遠鏡を実際 に運用するには、主鏡や撮像装置、分光装置の役割が重要であるのは当然であるが、 補佐的な役割として望遠鏡を支える架台や、星の追尾システム、観測中のシーイン グや自動フォーカス調整システムなども観測データに決定的な影響をあたえる場合 がある。天文台建設後も継続的にシーイングを調査して、良好な観測環境を維持す ることは重要である。今回製作した DIMM が、その中心的な役割を果たすものと期 待される。

一方、本開発にあたっては、C 言語による機器制御の基礎を学ぶことができると期 待される。その技術が今後の望遠鏡の立ち上げの中で必須となる「オートガイダー」 の開発に結びつくであろう。オートガイダーは星の追尾のほか、望遠鏡を通したシー イング測定、自動フォーカス調整などの重要な機能を有している。

オートガイダーで得られるシーイングは、DIMMによって得られるナチュラルシー イング(観測値の気象条件によって得られるシーイング)ではなく、望遠鏡の性能や ミラー周辺の温度非一様性に起因する望遠鏡シーイングの評価に用いることができ る。すなわちオートガイダーの開発を行なうことにより、1.5m 望遠鏡計画における 機器開発に貢献することに加えて、ナチュラルシーイング・望遠鏡シーイングとい う2種類のシーイングを得られることで、シーイングを乱す原因究明など、より的 確なシーイング環境保持も可能になる。

本研究の主目的は、広島大学独自の DIMM の開発と天文台サイトのシーイング調査を行なうことであり、併せてオートガイダーの開発を前提にした技術を取得する ことも目標とする。

第2章 シーイング

2.1 シーイングの重要性

地上から天体を観測すると星像が歪む。これは地球大気の擾乱などにより天体から来る光の光波面がゆらいでしまうためである。この星像のゆらぎを定量化したものをシーイングと呼び、通常輝度分布のFWHM[arcsec]で表す。日本でのシーイング環境は、本来理想的な点光源である恒星の1秒角前半が最高値といわれている。

サイト	シーイング値 [arcsec]	文献
福成寺周辺	1.23 ± 0.26	上田修論 (2004)
岡山天体物理観測所	1.21 ± 0.23	上田修論 (2004) ほか
東京大学木曽観測所	2.3-3.2	峰崎 (1998)
すばる望遠鏡	0.6	宮下 (2003)

表 2.1: 福成時と日本における天文台サイトのシーイング値

()すばる望遠鏡は世界有数の良シーイングサイトであるハワイ島マウナケア山に あるため、日本国内のサイトとは扱いを別にした。

一般に、1.5秒角を切るようなサイトは良シーイングサイトとされている。

ところで、大気による擾乱が無い場合に得られる星像の分解能は、望遠鏡の口径に もよる。望遠鏡の口径と、空間分解能(回折限界)の関係は以下の式であたえられる。

$$L[\operatorname{arcsec}] = 1.22 \left(\frac{\lambda}{\mathrm{D}}\right)$$
 (2.1)

ここでのLは回折限界、 λ は波長、Dは口径である。赤外シミュレーターは口径1.5mの望遠鏡であり、可視光の波長650nmを観測すると仮定すると、そのときの回折限界は約0.09[arcsec]と計算できる。

シーイングサイズと、望遠鏡の回折限界の数値を比べてみるとわかるように、広島大学に移管される赤外シミュレーター 1.5m 望遠鏡の回折限界は一般によいとされているシーイングサイズをはるかに下回っている。このことから実質問題としてシーイングサイズが観測結果の空間分解能へダイレクトに効いてくることになる。

また、シーイングがよいということは星像がぶれにくいということからピークの フォトンカウントにも影響する。フォトンカウントはCCD上の2次元で情報を得て いるため、シーイングの自乗に反比例する。これは、分光観測するときに決定的な 影響を及ぼす。細スリットで天体像を絞る分光観測のときには、ピークカウントに より多くのフォトンを得ることが、精度のよいデータになりえるからである。

以上のことから、シーイングのよいサイトを選ぶことは本質的に重要であること がわかる。

2.2 地球大気の理論的扱い

2.2.1 大気の擾乱とシーイング

シーイングを観測的に評価するには、地球大気の擾乱を理論的に扱う必要がある。 それは、大気の擾乱などにより屈折率が時間的・空間的に変動し、天体光の強度や 入射角が光路ごとにわずかに揺らぐためである。大気の屈折率は温度におおきく依 存する。そのため、天体光の光波面の乱れは主に大気中の温度分布が一様でないた めに生じる。

太陽からあたえられる熱量は場所によって異なるため、大気中の 1m~1km といった大きなスケールの温度分布 (屈折率分布)を生じさせる。これが風の流れや対流によって次第に細かく砕かれていき、最終的には屈折率が一定の 1~2 mm から数 10 cm のスケールのかたまりに分かれる。多くのこのようなかたまりが時間的・空間的に不規則に動きまわって擾乱を引き起こす。

2.2.2 Kolmogorov 乱流と空間内の屈折率揺らぎ

地球大気を理論的に扱うとき、流体力学を用いてそれを記述するが、それだけでは 現象論の領域をでない。擾乱した大気のなかを進む光の伝播理論を物理学的に扱う には、地球大気を統計的に扱う必要がある。これを可能とした理論が、Kolmogorov の乱流理論である。

大気中で1つのかたまりとして存在できる最大の乱流スケールを*L*₀とし、レイノルズ数が臨界レイノルズ数を超えないぎりぎりの乱流スケールを*l*₀とする。レイノルズ数*Re*は、流体力学において、流れを特徴づける最も重要な無次元のパラメーターとされているもので、以下のように定義されている。

$$Re = \frac{v_t l}{\nu}$$

$$v_t: 流れの速度 (m/s) \qquad (2.2)$$

$$l: 乱流スケール (m)$$

$$\nu: 大気の動粘度 (m2/s)$$

レイノルズ数が臨界レイノルズ数より小さい場合、流れは一様で規則性のある層 流状態となる。逆にレイノルズ数が臨界レイノルズ数 *Re*cr より大きくなる場合、流 れが不安定になり、乱流状態に移行する。

大気が 20 の場合、 $v_t=1 \text{ m/s}$ 、 $L_0=15 \text{ m}$ 、 $\nu = 15 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ であると仮定すると、レイノルズ数は $Re = 10^6$ となる。一般的に Re_{cr} は約 2 × 10^3 なので、この大気中では乱流が完全に発達すると考えられる。

Kolmogorov の乱流理論では乱流スケールを $\kappa_{L_0} = 2\pi/L_0$ 、 $\kappa_{l_0} = 2\pi/l_0$ のような 波数で表す。また、 $\kappa_{L_0} < \kappa < \kappa_{l_0}$ の波数領域を慣性小領域とよび、この領域内で Kolmogorov の乱流理論が成り立つ。慣性小領域では、 $Re > Re_{cr}$ なので、乱流状態 にある。また、慣性小領域では粘性の影響を無視できるので、大きい塊から小さい 塊への運動エネルギー転換率 ε は一定となり、低波数域 κ_{L_0} から高波数域 κ_{l_0} へ乱流 スケールが細かくなっていく。

乱流の原因となる最大の乱流スケール L_0 は、地形やその放射特性による。 $l \approx L_0$ の間は乱流は等方性を示さないが、それが細かく砕かれていく過程でだんだんと等方性に近づくことは予想できる。このような局所的に等方性としてみなせる乱流を局所等方性乱流と呼び、一様な局所等方性乱流では地球大気を統計的に扱うことができる。

ここで、空間内のある 2 点における屈折率の相関について考える。x 点での屈折 率 n(x) を、空間平均値 $\langle n \rangle$ からの変量 $\Delta n(x)$ を用いて

$$n(x) = \langle n \rangle + \Delta n(x) \tag{2.3}$$

と表す。このとき、x点の屈折率変量と、x点からわずかに離れたx + r点での屈 折率変量との間の構造関数は、以下のように書くことができる。

$$D_n(r) = \langle |n(x+r) - n(x)|^2 \rangle \tag{2.4}$$

ここで、〈〉は空間変数 x に亘る平均を表す。

慣性小領域中では、乱流のスケール1が十分大きい間は粘性の影響をほとんど受けないので、大きなかたまりから小さなかたまりへのエネルギーの移行には極めて わずかなエネルギーの損失しか生じない。このことから局所的な乱流速度vは粘性 によらず、確率変数として扱うことができる。よって、vはその塊のスケールrと密 度 ρ 、および単位質量単位時間あたりのエネルギー転換率 ε (erg/sec/kg)のみに支配 される。次元解析を行うと、これらの物理量の組み合わせで速度の次元を持つもの は $(\varepsilon r)^{\frac{1}{3}}$ のみであり、 $v \propto (\varepsilon r)^{\frac{1}{3}}$ の形に書くことができる (Landau & Lifchitz 1959)。

以上のことから、rだけ離れた2点における、2点を結ぶ方向の速度成分に関する 構造関数 $D_{rr}(r)$ は、 ε とrの関数として、以下のように書き換えられる。

$$D_{\nu}(r) = \langle |\nu(x+r) - \nu(x)|^2 \rangle = \mathcal{C}(\varepsilon r)^{\frac{2}{3}}, l_0 \ll r < L$$
(2.5)

ここでCは無次元の定数である。

一方、温度勾配が断熱的なものからずれた大気中では、流体の運動に影響せず、 化学反応もおこさないような物理量の揺らぎも Kolmogorov の法則に従うことが A.M.Obukhov によって示されている。このことから、屈折率揺らぎに密接に関係の ある温度揺らぎも上記に記す速度揺らぎと同様の式になる。

以下の式は、(2.5)式に対応した Tatarski による屈折率の構造関数である。

$$D_n(r) = \langle |n(x+r) - n(x)|^2 \rangle = C_n^2 r^{\frac{2}{3}}, l_0 \ll r < L$$
(2.6)

 C_n^2 は屈折率の構造定数と呼ばれるもので、屈折率揺らぎの大きさに直接的に結び 付く量である。

2.3 DIMM

DIMMは、2つの開口 (aperture) で同じ星から得られる2つの星像を観測する。そして、それぞれの星像の重心揺らぎを計測して、その結果が星像輝度分布のFWHMの値を換算する。このFWHMをシーイング・サイズ (又は単にシーイング)とよぶ。 口径間方向に平行な方向を longitudal 方向、それに直交する方向を transverse 方向として、シーイングはその方向ごとに求める (図 2.1 参照)。



図 2.1: DIMM の模式図

DIMMは、以下の点で非常に優れたシーイングモニターであることがいえる。

1つめは温度変化による影響が少ないこと。つまり外気温変化によるフォ - カス ずれの影響が少ないことである。2つめは、シーイング測定中の望遠鏡振動の影響 がないということである。DIMM は2つのスポットから得られる星像の相対的な重 心揺らぎを測定するからである。そして最後に、開口の小さい望遠鏡でもシーイン グの測定が可能である点。このことから、シーイングモニターの望遠鏡にかかるコ ストを抑えることができる。

以下では、DIMM によって得られる2つの星像の重心運動とシーイングとの関係 を理論的に説明する。

天体から届く可視光線は、地球に届くまでは平面波とみなせるが、地球大気中を 伝播すると、大気の擾乱を受けて波面が乱される。その光波面の乱れを *z*(*x*, *y*) とす ると、

$$z(x,y) = \frac{\lambda}{2\pi}\phi(x,y) \tag{2.7}$$

と表される。ここで、 $\phi(x, y)$ は、位置(x, y)での波面位相誤差である。光が進む 方向と光波面は垂直なので、到達する光の進行方向の垂直からのずれを、X方向、Y 方向でそれぞれ α 、 β とおくと、

$$\alpha(x,y) = -\frac{\partial}{\partial x}z(x,y) = -\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)\frac{\partial}{\partial x}\phi(x,y)$$

$$\beta(x,y) = -\frac{\partial}{\partial y}z(x,y) = -\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)\frac{\partial}{\partial y}\phi(x,y)$$
(2.8)

となる。この変動はガウス分布に従う。(参考文献[11])

ここで空間的に離れた点どうしの α の相関、つまり乱流中にどの程度秩序がある かということを定量的に示すため、α の共分散を以下のように定義する。

$$B_{\alpha}(\mu,\eta) = \langle \alpha(x,y)\alpha(x+\mu,y+\eta) \rangle$$
(2.9)

 (μ, η) は、(x, y)からの位置のずれの量を表す。 また、位相変動の共分散 $B_{\phi}(\mu, \eta)$ は、

$$B_{\phi}(\mu,\eta) = \langle \phi(x,y)\phi(x+\mu,y+\eta) \rangle \tag{2.10}$$

と定義すると、 α の共分散 $B_{\alpha}(\mu,\eta)$ と位相変動の共分散 $B_{\phi}(\mu,\eta)$ は以下のように 関係づけられる。

$$B_{\alpha}(\mu,\eta) = -\frac{\lambda^2}{4\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial\mu^2} B_{\phi}(\mu,\eta)$$
(2.11)

擾乱する地球大気中を光が通過すると、空間的に屈折率が違うために光波面が無 秩序に凹凸になる。



図 2.2: 波面位相誤差のイメージ

この光波面の構造関数は、Fried により、波面構造関数D(r)として定義され、"The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy §7" のなかで以下のように記述されている。

$$D(r) \cong D_{\phi}(r)$$

$$D_{\phi} : 位相構造関数$$
(2.12)

このとき、前述の Kolmogorov 局所的等方性の仮定をすると、波面構造関数は以下のように直される (参考文献 [13])。

$$D_{\phi}(r) \cong D(r) = 6.88 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}}$$
 (2.13)

 r_0 は Fried parameter とよばれる。

位相構造関数 $D_{\phi}(r)$ は、位相誤差の構造を定量的に示した物理量であり、以下の ように定義されている。

$$D_{\phi}(\mathbf{r}) = \langle |\phi(\mathbf{x} + \mathbf{r}) - \phi(\mathbf{x})|^2 \rangle$$

 $\phi(\mathbf{x}) : \mathbf{x}$ での位相のずれ量
$$(2.14)$$

これは、開口面上で距離 r 離れた 2 点における位相の差の二乗を全空間に対して 平均をとったものになっている。

この位相構造関数の定義をよく見ると、 $D_{\phi}(\mathbf{r})$ は2つのスポット間の位相差 $\delta\phi(\mathbf{r}) = \phi(\mathbf{x} + \mathbf{r}) - \phi(\mathbf{x})$ の分散であることが分かる。空間に対する位相の変動は(2.8)式に従って光の進行方向(λ,β)の変動を生じさせるため、結果として像位置が変動する。ある母集団のある時間での平均と、その集団に含まれるある部分の時間平均が同等であるというエルゴード性を仮定すると、空間に対する分散は、ある地点での時間変動に対する分散と等しくなる。これにより、長時間露光した星像の広がり(FWHM)は、(2.8)式に対応する分散で表すことができる。

 $\mathbf{r} = (\mu, \eta)$ として表した位相構造関数 $D_{\phi}(\mu, \eta)$ は、共分散を用いて以下のように表される。

$$D_{\phi}(\mu,\eta) = 2[B_{\phi}(0,0) - B_{\phi}(\mu,\eta)]$$
(2.15)

これと B_{α} の式より、

$$B_{\alpha}(\mu,\eta) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial\mu^2} D_{\phi}(\mu,\eta)$$
(2.16)

 $D_{\phi} \in B_{\alpha}$ の式に代入すると、

$$B_{\alpha}(\mu,\eta) = \left(\frac{\lambda^2}{8\pi^2}\right) \frac{\partial^2}{\partial\mu^2} D_{\phi}(\mu,\eta)$$

= 0.087\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} \frac{\partial^2}{\partial\mu^2} [\mu^2 + \eta^2]^{\frac{5}{6}}
= 0.145\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} \left[(\mu^2 + \eta^2)^{-\frac{1}{6}} - \frac{1}{3} \mu^2 (\mu^2 + \eta^2)^{-\frac{7}{6}} \right] (2.17)

ここで $\eta = 0$ とすると、longitudinal 方向での距離 $\mu = d$ での共分散は以下のように得られる。

$$B_{l}(d) = B_{\alpha}(d,0) = 0.097 \left(\frac{\lambda}{r_{0}}\right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{\lambda}{d}\right)^{\frac{1}{3}}$$
(2.18)

また、transverse 方向での距離 $\eta = d$ での共分散の式は $\mu = 0$ として以下の式で 表される。

$$B_t(d) = B_{\alpha}(0, d) = 0.145 \left(\frac{\lambda}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{\lambda}{d}\right)^{\frac{1}{3}}$$
(2.19)

このように transverse 方向の共分散は longitudinal 方向の共分散より、1.5 倍大きな値となる。また、どちらも口径間距離 d の -1/3 乗で減衰する。これは実験的によく確かめられている。

この式に従うと、口径間距離 $d \in 0$ に近づけていくと B_{α} が発散してしまうこと になるが、実際には d = 0 での値は、開口中で平均をとるため発散せず、このよう なことは起こらない。d = 0 での値は Tatarski(1971) と Fried(1965, 1975) によって 以下のように与えられている。

$$B_t(0) = B_l(0) = B_{\alpha}(0,0) = 0.179 \left(\frac{\lambda}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{\lambda}{D}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$D: \Box i \overline{P}$$
(2.20)

以上のことから、口径間距離 d に関する星像重心の相対的な揺らぎの分散は以下 の式で与えられる。

$$\sigma_t^2(d) = 2[B_t(0) - B_t(d)]$$

$$\sigma_l^2(d) = 2[B_l(0) - B_l(d)]$$
(2.21)

この $\sigma(d)$ が DIMM によって測定される値である。 d>2D の時、 longitudinal 方向 の分散 σ_l^2 は

$$\sigma_l^2 = 2\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} [0.179D^{-\frac{1}{3}} - 0.0968d^{-\frac{1}{3}}]$$
(2.22)

d>2Dの時、transverse 方向の分散 σ_t^2 は

$$\sigma_t^2 = 2\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} [0.179 D^{-\frac{1}{3}} - 0.145 d^{-\frac{1}{3}}]$$
(2.23)

上の式から、2つの開口を用いた DIMM の測定により、その開口に対する longitudinal、transverse 方向それぞれの Fried parameter r_0 を求めることができる。

一方、シーイングは星像の輝度分布の FWHM であたえられる r₀ と、星像輝度分 布の半値幅との間には、Dierickx (1988) によって行なわれた、長時間露光した場合 の星像を数値的シミュレーションにより、以下の関係が与えられている。

$$FWHM = 0.98 \frac{\lambda}{r_0}$$
(2.24)

この式を用いることによって、DIMM から得られた星像揺らぎ (σ_l, σ_t) の情報から 星像分布の FWHM(シーイング) を求めることができる。 しかし、このまま式 2.24 を観測結果に用いると、観測対象天体の高度が下がれば 下がるほど大きな FWHM の値を返す。これは、天体の高度が下がると、天体から の光路が地球大気により多く接することになり、大気の擾乱の影響が増してくるた めである。このため、シ - イングは天体が常に天頂にあるということを仮定して、 得られた Fried Parameterr₀ に天頂角補正を行なう。

天頂角補正は以下の式に基づいて行なう。

$$r'_0 = (\cos\gamma)^{3/5} r_0 \tag{2.25}$$

 r_0 は測定から得られた Fried parameter、 γ は zenith angle である。(参考文献 [6])

第3章 広島DIMMの開発

シーイングは本格的な観測を行なう天文台において死活問題であり、建設時にシー イング環境が良好なサイトを選択することはもちろん、建設後もその保持のための シーイング調査を継続的に行なうことが必要である。

2003年に行ったサイト候補決定のためのシーイング調査では,京都大学のDIMM を借用したが、天文台を運用していくためには継続的なシーイング調査を行なう必 要があるため、この度広島大学でオリジナルのDIMMの開発をすることにした。

広島大学で開発した DIMM(以下広島 DIMM と呼ぶ) は借用した京都大学の DIMM と同様に、望遠鏡の開口部に取り付けてある2つの合同な穴の片方に、光路を曲げ るためのプリズムを取り付けている。これによりひとつの望遠鏡で2つの光路を通 る星像を撮像することができ、望遠鏡の揺れによる影響を無視できる構造になって いる。また、広島 DIMM の CCD は京都 DIMM の CCD に比べて非常に安価になっ ている。京都 DIMM は CCD に Image Intensified CCD(150~200万円)を採用してお り、広島 DIMM の CCD よりも感度が約10 倍高い。このことによって、京都 DIMM は5等星までの天体を使ってシーイング測定を行なうことができる。しかし、シー イング測定を行なうだけの目的であるならば、暗い天体を観測する必要はなく、2等 星までの星を観測できれば十分である。広島 DIMM では2等星までしか観測できな い通常の CCD(4万円)を搭載しているが、この性能はシーイングモニターとしては 十分なものであり、この結果、機器全体として非常に安価なものになっている。表 3.1 に広島 DIMM の仕様を記述する。

なお、本 DIMM の設計には約2週間、物品の調達と加工に1ヶ月半、組み上げと 制御ソフトウェアの立ち上げに1ヶ月半ほどを費やした。この工程のうち、私は組 み上げと制御ソフトウェアの立ち上げ、及びその後の較正と測定を主導で担当した。

3.1 ハードウェア

3.1.1 望遠鏡

・MEADE LX200GPS-20(シュミットカセグレン式)



図 3.1: 広島 DIMM

表 3.1: 望遠鏡の仕様

口径	203mm
口径比	F/10
焦点距離	2000mm
焦点面スケール	103.13 秒角 /mm
寸法	鏡筒約 50cm × 20cm 、脚立 約 1m
重量	約 30kg(うち望遠鏡部約 20kg)
エクステンダーレンズ	(140)31.7mm 径

広島 DIMM は低価格で性能面においても信頼性のあるものを目指した。MAEDEの 望遠鏡は安価ながらも我々の要求する機能をみたした望遠鏡である。MEADE LX200 GPS-20 は、GPS 機能を有し、自らの位置座標を自動的に取得することができる。ま た、方位や水平位置を自動認識するセンサーも有している。さらに任意の星2点の 座標を入力することで、座標の微調整がおこなわれ、星の自動追尾を行なう。これ により、長時間のシーイング観測を可能にする。

しかし、実際観測する場所は山のなかであり、腐葉土の上で望遠鏡のセッティン グを行なうと、地盤が一定に保たれていないために座標のエラーが発生し、星を見 失うことが多々ある。数時間に渡り、自動的に安定したデータ取得にはこの問題を 克服する必要があるが、我々は 20 分~30 分おきにマニュアルで調整することによ り、データの長時間取得を行なった。

3.1.2 ウェッジ・プリズムとマスク

ウェッジ・プリズムは光を屈折させるためのものである (図 3.2)。望遠鏡入光部に あるマスクの開口部の片方に取り付けることにより、ウェッジを通過した光のみが 屈折される。これにより、焦点面では一つの星から二つの星像が結像される。



図 3.2: ウェッジ部

表 3.2: ウェッジの仕様

材質	BK7
頂角	50 秒角
メーカー	ジェネシア
形状	56 × 56 × 5mm

表 3.3: マスクの仕様

開口マスク	50mm × 2
開口間距離	144mm

ウェッジの頂角が α の場合、偏角は $n \sin \alpha - \alpha \cong (n-1)\alpha$ で表されるので、材質 BK7(波長 λ =5876 で屈折率 n=1.5168)・頂角 50 秒角のウェッジでは偏角は 25.84 秒角 (5876)となる。これは視野の約 1/7 に相当し、十分な分離が得られることに なる。

なお、ウェッジの両面には減反射のための単層膜コ - ティングが施されている。

3.1.3 撮像部

・CCD カメラ ワテック WAT-100N

表 3.4: CCD カメラの仕様

有効画素数	$768(H) \times 494(V)$
ユニットセルサイズ	8.4 μ m(H) × 9.8 μ m(V)
走查方式	2:1インターレース
焦点面スケール	103.13 秒角 /mm
シャッタースピード	OFF(1/60), 1/100, 1/250, 1/500, 1/1000,
	1/2000、1/5000、1/10000、1/100000





* NEPTUNE100は、赤外照射(800~950nm)装置との併用で可視光外の夜間撮影が可能です。

図 3.3: CCD の感度曲線 (ワテック社より)

・DV キャプチャー (信号変換器) カノープス ADVC-100

ここでも安価ながらも十分な機能というコンセプトの元に機器の選定を行なった。 この CCD カメラは約4万円で購入できる。機能面ではシャッタースピードを(表3.4) の範囲で変えることができ、十分な機能を得ている。ここで十分なシャッタースピー ドとは1フレームあたり1/1000sec 以内をさす。一般的に、シーイングを測定する

表 3.5: 望遠鏡と組み合わせたときの CCD カメラの仕様

空間分解能	0.451 \times 0.403 arcsec/pixel
視野	約 5.1arcmin × 3.7arcmin

際には、1/1000sec 程度のタイムスケールでの星像の揺らぎが計算できることが要求されており、本 CCD カメラはその水準をクリアしている。

図 3.3 は CCD の感度曲線を示してある。グラフはワテック社のものである。この グラフをみると、CCD の感度が一番高い波長は約 620[nm] であることがわかる。前 章で、シーイング FWHM は式 (2.24) で表されることを述べた。この式の波長 λ に は CCD の感度のもっとも高い 620[nm] を使っている。

ただし、シ-イング測定の上でこの波長を厳密に求める必要はない。前章の式 2.22, 2.23, (2.24) より、波長 λ の FWHM への寄与は FWHM $\lambda^{\frac{1}{5}}$ であり、仮に 550[nm] と 650[nm] を λ に当てはめたとしても、100nm の波長の誤差がシーイング値 に与える誤差は高々3%程度である。これは、実際のシーイングの標準偏差が 16%程 度だということと比較すると、無視できるレベルである。

望遠鏡 (エクステダーレンズ使用) 併用時の CCD カメラの空間分解能は、アルビ レオ (二重星) を用いて実測した (図 3.4)。



図 3.4: CCD で取り込んだアルビレオ (二重星)

アルビレオは近接する二つの天体から成り立っており、天体間の距離は 34.4[arcsec] である (参考文献 [12])。測定は、まずアルビレオを dvgrab(後述) で動画をノートパ ソコンに取り込み、transcode(後述) で 100 枚あまりの非圧縮 ppm 静止画ファイル (図 3.4) に変換した。この静止画ファイルを ランダムに 10 枚選択し、convert コマン ドで fits ファイルに変換した後、天文分野でよく使われるソフトウェアである IRAF を使って二つの天体の重心座標 (CCD ピクセルスケール)を取得した。次に2天体 の重心間距離を算出し、その値でアルビレオの天体距離 [arcsec] で割ることにより1 ピクセルスケール、すなわち空間分解能を算出した。

CCD ピクセルは縦と横でスケールが違うので、アルビレオの2天体を縦方向と横 方向の2方向に分けて測定した。

3.2 ソフトウェア

3.2.1 OS: Fedora core 2 (kernel 2.6.9-FC2)

Fedora は RedHat 社が RedHat Linux9 を最後にコンシューマ向け Linux の開発・ 販売を中止した事からその開発の継続を請け負った Linux ディストリービューショ ン制作プロジェクトである。広島 DIMM がこの OS を用いたのは、ソフトウェア (seemon2) が Linux 上で動作すること、Fedora core 2 の kernel バージョン 2.6.6 以上 でのインターフェースの取扱いが容易であるためである。インターフェース IEEE1394 は CCD カメラから動画を取り込む際に用いる。

また、この OS を選択した別の理由としては、ノートパソコンにインストールす る際に、DELL の B5 のノートパソコンの CD ドライブが外付けの USB 接続のため、 他の O S (Vine Linux、Redhat) が CD を認識しなかったこともあげられる。また、 Fedora core 3 は Fedora の最新 OS であるが、下記のアプリケーションがうまくコ ンパイルできなかったため、最終的に Fedora core 2 に収まったという経緯もある。

Fedora インストール時には、下記のソフト (dvgrab, transcode) のコンパイル、相 性問題のため、以下のインストールは必須である。

・GNOME デスクトップ環境

- \cdot nasm
- dvgrab
- ・各種開発ツール

3.2.2 画像取り込み: dvgrab version 1.5

dvgrab version 1.5 は Fedora インストール時のオプションに付いているソフトで、 カノープスキャプチャー器から送られるデジタル信号を IEEE1394 を介してパソコ ンに取り込むソフトである。コマンドから操作でき、C言語からのコントロールが 可能である。

3.2.3 画像変換: transcode version 0.6.6

http://www.zebra.fh-weingarten.de/ transcode/

transcode は Linux 用コマンド入力型高機能画像変換ソフトである。本 DIMM で は、dvgrab で取り込んだムービーを 50 フレームの非圧縮静止画ファイル (ppm) に変 換することを目的に導入された。このソフトウェアの問題点は相性問題である。2005 年1月現在で最新のバージョンは 0.6.12 であるが、この最新版 (その他のバージョ ンも然り) と Fedora は相性が悪く、最終的に通常に動く状態を確認したのは 0.6.6 の みであった。また、このソフトをコンパイルしただけでは transcode は正常に機能 しない。これは

- avi2yuv version 0.9.7-1
- ・gtk+-1.2 (1.2.4 以上のバージョン)
- gtk+-2.4
- ・glib+-1.2 (1.2.4 以上のバージョン)
- glib+-2.4
- atk-1.2
- pango-1.5

gtk+-1.2,gtk+-2.4 及び gtk+-1.2,gtk+-2.4 は別物である。

http://www.gtk.org/ http://libdv.sourceforge.net/

を、kernel version を変えてインストールし、もとの version に再起動させること で改善される。

また、取り込んだデジタルビデオ信号を transcode が扱えるように、 以下のライ ブラリを拡張する。

 ${\boldsymbol{\cdot}}$ libdv version 1.2

このライブラリは transcode をコンパイルする前にかならずインストールしなければならない。

捕捉であるが、transcode での画像変換に際して、画像の情報の保存性を重視するため、ノンインタレース方式にて変換している。

3.2.4 星像重心揺らぎ測定: seemon2 version 0.5.8-plus

星像の重心揺らぎを測定し、シーイング値を求めるソフトは seemon2 (岩田 2003) を利用した。seemon2 は、京都大学の岩田氏 (現在国立天文台岡山物理天体観測所) が開発した、シーイングサイズ FWHM を算出するソフトウェアである。広島 DIMM は、このソフトウェアを広島 DIMM に合うようにパラメータなどを改良した。また、 将来開発するであろうオートガイダーにむけて、seemon2 の一部を星像追尾システ ムに採り入れることを前提とした改良版を seemon2-plus とした。改良点は、Fried's paramater r₀ から星像の輝度分布の FWHM を求めるとともに、50 フレーム分を露 光した星像の輝度分布をガウシアンでフィッティングし、実際の輝度分布も同時に 求めることができるという点である。実際の輝度分布の位置情報がリアルに計算で きれば、時間の変化と共に星の移動する様子がわかることになり、星の重心位置の ずれをリアルタイムに補正することにより、確実に星を追尾することが可能になる。

現在は制御系を MEADE 望遠鏡の星像追尾システムに任せているため、この機能は OFF にしてある。

また、seemon2は以下のライブラリを必要としているので、別途インストールする必要がある。

• glibc (GNU C Library)

http://www.gnu.org/software/libc/libc.html

Fedora core 2の場合は、Fedora ホームページの FTP サイトで公開されている。

3.2.5 データ処理の流れ

星から来た光は、望遠鏡入射部に設けられた2つの穴を通る。片側の穴にはウェッ ジが取り付けられており、その頂角は焦点面で25秒角ほど星像がずれるように作ら れている。このため、焦点面に取り付けられているCCD(撮像装置)には1つの星像 に対して2つの星像ができあがる。この映像は、まずビデオカメラでNTSC方式の アナログ信号に出力される。NTSCはアメリカ、日本、台湾、韓国などで利用され ているテレビのカラー映像方式のことで、秒間29.27フレーム、走査線525本であ る。その後、DVキャプチャーにより、デジタルビデオ信号に変換され、IEEE1394 インターフェースを介してパソコンに取り込まれる。ブロックダイアグラムを図?? に示す。

パソコンでは約1.7秒の映像 (50 フレーム分) を transcode を用いて非圧縮静止画 ファイル (ppm) に変換し、1フレームごとにそれぞれ2つの重心を算出し、相対運 動を調べることで Fried parameter を計算し、シーイング (FWHM) を決定する。ま



図 3.5: ブロックダイアグラム

た、50フレームの中に星像がある程度以上にぶれているときや、雲に隠れて見えな くなってしまったときの静止画が混ざっているときは、その50枚分を破棄するもの とする。

3.3 京都 DIMM と同時試験観測

広島 DIMM 製作の完了にともない、正常に動作をしているか試験するため、岡山 天体物理観測所において、京都 DIMM との同時観測を行った。京都 DIMM は、京都 大学の 3.5m 級望遠鏡計画に実際に稼働している DIMM であり、広島大学から最も 近いところに設置されているために広島 DIMM の比較対象として最も適している。

3.3.1 京都 DIMM

京都 DIMM(図 3.4) は京都大学の岡山 3.5m 新技術光学赤外線望遠鏡計画のために 作られたシーイングモニターである。2003 年に広島大学が借用した当時は持ち運び 可能となっていたが、現在は岡山天体物理観測所 188cm 望遠鏡ドームの近くで据置 き機となっており、リモートでの星の導入、気象モニタ、星の自動追尾、自動開閉 ドームを備え、半自動・遠隔制御が可能な構成となっている。以下、京都 DIMM の 仕様を載せる。



図 3.6: 京都 DIMM の全体図 (現在は開閉ドームの中にセッティングされている)

口径	$50\mathrm{mm}$
口径間距離	144mm
寸法	鏡筒約 50cm × 20cm 、脚立 約 1m
重量	約 50kg(うち望遠鏡部約 20kg)
空間分解能	0.4982arcsec/pixel
視野	約 10arcsec
検出限界	約5等 (露光時間 1/500[sec/frame])
ビデオレート	1/30 秒
サンプリングレート	1秒(2003年5月2日まで)
	20 秒前後 (2003 年 5 月 27 日以降)
積分時間	1/150 秒 (2004 年より可変)

表 3.6: 京都 DIMM の仕様

3.3.2 同時試験観測

試験観測は2004年11月29日から30日までの計2日行った。29日は基本的に晴れであったが、ときどき雲がかかって星を見失ってしまった時間があった。30日は 測定開始から19時半頃は一部に雲が現れたものの、概して安定した晴天であった。 次に京都 DIMM と広島 DIMM のシーイング時間変動のグラフと、ヒストグラムを 載せる。



図 3.7: 広島 DIMM と京都 DIMM



図 3.8: 2004 年 11 月 29 日 広島 DIMM と京都 DIMM のシーイングデータの比較



図 3.9: 2004 年 11 月 30 日 広島 DIMM と京都 DIMM のシーイングデータの比較

29日の広島 DIMM のプロットが京都 DIMM に比べてにデータが欠落している時間が多いのは、広島 DIMM の望遠鏡の初期設定が適切になされていなかったために 星の追尾失敗し、CCD に星像が映らなくなってしまったためである。なお、初期設定の誤差はシーイング値には影響しない。

二つのグラフを全体的にみると、広島 DIMM と京都 DIMM の全体的な傾向はよ く似ている。それは、29日のグラフでみると、20時から 23時にかけてのシーイン グ値の上昇、23時から 26時までのシーイング値の減少、26時から 28時までの上昇 の3箇所、30日のグラフで言えば、18時後半以外での全体的にシーイングの変化 のない特徴が両 DIMM で表現されている。なお、30日の18時 30分から 19時にわ たって大きくぶれているが、このぶれをみると広島 DIMM と京都 DIMM では時間 差がある。このとき、広島 DIMM と京都 DIMM は互いに離れた位置にある星を観 測しており、星の位置関係を考慮すると、これは上空の乱流ゾーンの移動を表して いる可能性がある。しかし、これについては本研究に重要な項目ではないので、こ の程度にとどめておくことにする。

29日のデータに関して、全体として京都 DIMM が小さい結果をあたえているこ とは大気境界層と両 DIMM の地上高度の違い (京都 DIMM4m、広島 DIMM1.5m)を 考慮するとリーズナブルである。この大気境界層は地表面や海面の摩擦、熱の影響 を直接的に受ける層のことであり、この層を通じて、熱と水蒸気が大気に運ばれて いる。この大気境界層の最下層に位置するのが接地境界層であり、地表面と大気の 間の熱、水蒸気、運動量のやりとりを行なっている。シーイングは2章に述べたよう に大気の擾乱に左右される。大気の擾乱は空間ごとの熱の変化に起因する。よって、 地上高度の低い場所ではシーイングは熱をやりとりする接地境界層に影響する。接 地境界層のスケールハイトは10~数10mであり、この空間内では、高度を変えてい くと、高くなるにつれてシーイングは log で減少する。このことから、京都 DIMM と広島 DIMM の結果は consistent であり、広島 DIMM は問題なくシーイング測定 に使えると判断した。

第4章 シーイング測定と考察

4.1 天文台建設予定地におけるシーイング測定

第1章では天文台建設予定地が福成寺に決定したことを述べたが、それに伴う調査は予定地周辺であり、建設予定地でのシーイング調査はこれまでされていなかった。それは、建設地が木々で密集していたために空が枝で隠され、シーイング調査ができなかったためである。

2004年10月に、ようやく建設予定地半径15mの領域で木の伐採が行われ、調査の行える環境になったため、今回初めて現地でのシーイング調査を行った。



図 4.1: 伐採後の天文台建設予定地

期間は11月後半から1月下旬まで行った。次にその結果を載せる。

4.1.1 11月24日



図 4.2: 11月24日 建設予定地におけるシーイングの時間変動とヒストグラム

この日はよく晴れており、安定した観測を行なうことができた。風はおだやかで あり、地上 7m の高さでポールに据え付けてあった気象センサからのデータによる と、風速は北東に 0.9~1.3[m/s] を示していた。後半に突然シーイングが乱れている 箇所があるが、これはよく見られるような突発的現象で、長くは続かない。

4.1.2 12月6日



図 4.3: 12月6日 建設予定地におけるシーイングの時間変動とヒストグラム

この日も、特に大きな雲はなく、安定してデータのとれる環境であったが、望遠 鏡の初期設定(アライメント)を精度よく設定できていなかったため、頻繁に星を見 失ってしまった。このため、星を見失ったことに気づかなかった時間帯では、デー タに大きな欠落が見られる。また、この日のシーイングは1.3秒台と、福成寺の傾 向としては比較的悪い値となった。風速は一貫して0[m/s] だった。

4.1.3 12月9日



図 4.4: 12月9日 建設予定地におけるシーイングの時間変動とヒストグラム

この日はやや曇っており、長時間の観測ができなかった。望遠鏡の設定による長期間星を見失うことはなかったが、19.8時前に雲が測定対象天体をかくし、数分測定を中断した。20.3時頃になって、あたりが完全に雲に隠れてしまい、雲が晴れる見込がなかったため、その時点で測定を終了した。風は東南東に0.9~1.4[m/s]の風が吹いていた。

4.1.4 12月13日



図 4.5: 12月13日 建設予定地におけるシーイングの時間変動とヒストグラム

この日はよく晴れていたため、長時間の観測ができた。所どころ、大きなデータの欠落があるが、これはシステムが不調になり、データが取得できなかったためである。このシステムの不調は、パソコンを再起動しなければ完全に修復できず、再びデータの取得が行なえるようになるまでに多少の時間を要す。また、このシステム不調は、画面をよく見ていないと発見しにくく、対応が遅れると大きなデータの欠落を招く。この日の風は北々東に 0.4~1.3[m/s]の速さで吹いていた。

36

4.1.5 1月12日



図 4.6: 1月12日 建設予定地におけるシーイングの時間変動とヒストグラム

この日は雲が多少かかっており、対象天体も薄雲がかかっていたが、モニターする には十分な光量であったため測定した。しかし21時付近で天体が雲に隠れてしまっ たため、数十分測定を中止した。21時過ぎに天体が見えてきだしたが、その後も時 おり雲がかかり安定したデータがとれないために22時前に測定を切り上げた。この 日のシーイングは比較的よく、平均1.2秒台であった。風は北方向に0.4~0.9[m/s] の速さで吹いていた。

4.1.6 1月17日



図 4.7:1月17日 建設予定地におけるシーイングの時間変動とヒストグラム

この日も全体的に雲がかかっていた。21時前から21時中盤にかけて天体が雲に 隠れてしまい、その後も安定したデータがとれないため、22時前半に雲が完全にか かった時点で終了した。この日の風は北方向に3[m/s]の速さで吹いていた。

表 4.1: 天文台サイト 2004 年度シーイング結果

日にち	中央值 [arcsec]	最頻值 [arcsec]	風向・風速 [m/sec]
11月24日	1.04	1.0	北東 ~1
12月6日	1.34	1.3	南 ~0
12月9日	1.35	1.3	東南東 ~1
12月13日	1.39	1.4	北北東 ~1
1月12日	1.23	1.1	北~0.4
1月17日	1.16	1.0	<u>北</u> ~3
()1月26日	1.30	1.2	北~0
平均	1.26 ± 0.18		

()1月26日のグラフは次節の図4.8に記載してある

表4.1 に全ての晩の測定値をまとめている。

地上7mにおける風向・風速とシーイングにはあまり相関がないように思える。 この表4.1と、第1章で示した福成寺周辺のシ-イング値(表1.1)を見比べてみ ると、望遠鏡移設候補地でのシ-イングがこれまで福成寺周辺で測定したシ-イン グとほとんど同じ結果(両デ-タからの平均が1.2秒台)が得られた。このことは本 研究をする以前に予測されていたことであったが、今回の測定により、移設候補地 が良シ-イングサイトであるということを初めて確認した。日本において、冬期は 一般にシーイングが悪くなる傾向にあるが、それでもよい値を示し続けたことは特 筆に値しよう。以上のことにより、天文台建設後も日本全国においてトップレベル のシ-イング環境で観測できることが約束された。

4.2 シーイングと露光時間

星像の乱れは大気擾乱の影響をうけるが、それ以外にも1フレームあたりに星像 を何秒露光をするかという露光時間にも影響される。一般的に1フレームあたりの 露光時間を多くすれば DIMM が出力するシーイングの値は一見良くなる。これは、 星像の重心位置が露光時間の増大によりなまされてしまい、測定される重心のぶれ が、実際の重心のぶれよりも小さくなってしまうためである。この露光時間による シーイング値の変化は、ナチュラルシーイングのような環境特有の値ではなく、観 測機器の設定によるものであるので、露光時間をどのように設定するのかという問 題はシーイングを測定する上で重要なことと言える。一般には1/1000 秒程度の露光 時間が要求されているが [参考文献 [6]]、これはその地域における気象環境によるも のであり、福成寺ではどの程度の露光時間に設定すべきなのかを把握しておくこと は必要である。本卒業論文では、この露光時間がシーイング測定値にあたえる寄与 の調査を DIMM の開発の一部として実施した。

シーイングは常に一定ではなく、前節に用いたシーイングの時間変化のグラフを参照すればわかるように、数分のタイムスケールで変化する。このため、1つのDIMM でシーイングの露光時間変化をモニターしても、シーイングの変化が露光時間の変 化によるものなのか、ナチュラルシーイングの時間変化によるものなのかを特定で きない。このため、2つのDIMMを用いて、片方のDIMMを露光時間を一定に設 定し、ナチュラルシーイング変化の補正として同時に観測する必要がある。

露光時間のシーイングにあたえる影響を調べる手段として、今回は広島 DIMM と 教育学部で同時期に作った DIMM の 2 つを用いた。

4.2.1 教育学部 DIMM

教育学部の DIMM は、広島 DIMM の仕様とほぼ同じであり、マスクに空けてある 2 つの穴やウェッジプリズムなどハード的なものからソフトウェアまで、広島 DIMM と同じものを使用している。異なる点は、教育学部の DIMM の望遠鏡の口径が広 島 DIMM の 20cm と比べて 5cm 大きい 25cm であるということ、及び 2 つの開口間 の距離が 5cm 増えて 19.4cm になっていることである。このため、焦点距離が広島 DIMM と比べ長くなっているので、CCD に作られる 2 つの星像の間隔は広島 DIMM に比べて広くなる。しかし、シーイング値に影響する Fried Parameter は焦点面に 作られる星像の間隔には影響されず、マスクに空けてある 2 つの穴の開口間距離、 直径に影響される。これらのパラメ - タは、seemon2 の内部パラメ - タを変更する ことで広島 DIMM と同等のシステムに補正している。

以下に教育学部の DIMM の望遠鏡の仕様を書く。

表 4.2: 教育学部 DIMM の望遠鏡の仕様

望遠鏡	MEADE LX200GPS-250(シュミットカセグレン式)		
口径	254mm		
口径比	F/10		
焦点距離	2500mm		
焦点面スケール	82.506 秒角 /mm		
寸法	鏡筒約 50cm × 20cm 、脚立 約 1m		
重量	約 40kg(うち望遠鏡部約 30kg)		
エクステンダーレンズ	(140)31.7mm 径		

4.2.2 教育学部 DIMM キャリブレーション

露光時間変化によるシーイング値の変化を調べるためには、前節で述べたシーイングの時間変化を考慮しなければならない。そのためにリファレンスのデータも取るが、リファレンスでの補正を最小限にするために、データを取る環境はなるべくシーイングの安定した時間帯で取ることが望ましい。

測定日は、2005年1月26日に行なった。この日は図(4.8)を参照すればわかるように、測定前半はシーイングもよく、比較的安定したデータが取れ、露光時間変化を調査する最適の環境になった。



図 4.8: 1月26日 建設予定地におけるシーイングの時間変動とヒストグラム

最初に広島 DIMM と教育学部 DIMM を同じ積分時間 1/2000[sec/frame] でシーイングの同時測定を行なった。これは、広島 DIMM と教育学部 DIMM の示すシ - イング値に違いがあるかを試験するためである。以下はそのグラフである。



図 4.9:1月 26日 広島 DIMM と教育学部 DIMM の同時シーイング観測結果

この図をみると、教育学部 DIMM のほうが、広島 DIMM よりも若干小さい値を 返しているように見える。この理由としては、双方の DIMM に設定している CCD のピクセルスケールエラ - が影響しているものと考えられる。

広島 DIMM は、岡山天体物理観測所にて京都 DIMM とキャリブレ - ションを行 なっており、大局的に見て同じ値を返していた。このため広島 DIMM の信頼性は、 何の比較も行なっていない教育学部 DIMM よりも高い。

教育学部 DIMM の CCD ピクセルスケ - リングでは、広島 DIMM のピクセルス ケ - リング時に用いたアルビレオとは違うトラペジウムを用いた。これは、教育 DIMM の CCD ピクセルスケ - リングを行なった時期にアルビレオを撮像すること が難しく、スケ - リングに使用できる適当な星がトラペジウム以外に見当たらなかっ たためである。この星は近接する 4 つの天体から成り立っている多重星で、その天 体の間隔はアルビレオよりも狭い。このために、星像ぶれによるスケ - リングへの 影響が、アルビレオ使用時のスケ - リングよりも多くなる。また、トラペジウムを 撮像した場所がシ - イングのよくない広島大学構内の駐車場であるため、星像のぶ れがピクセルスケ - ルエラ - におおきく関与していると予想される。 実際に広島 DIMM と教育学部 DIMM の系統的な誤差を調べてみた。それぞれの DIMM で得られたシーイングデータから、ある時間の前後 1 分間を 30 秒間隔で移 動平均し、それぞれの時間における平均を広島 DIMM と教育学部 DIMM で比較し た。この結果、広島 DIMM のほうが平均して 1.16 ± 0.06 倍ほど教育学部 DIMM よ りも高い値を返していた。

大局的にみると、19時中盤の山を広島 DIMM、教育学部 DIMM は共に表してお リ、シーイングの時間的揺らぎに関しては特に問題ないことがわかる。以上のこと から教育学部 DIMM の返した値へ系統的に 1.16 ± 0.06 倍することにより、教育学 部 DIMM の返した値は相対的には広島 DIMM と同じ扱いをすることができると考 えられる。

4.2.3 露光時間変化を伴うシーイング観測

露光時間変化によるシ-イング測定は、教育学部 DIMM で行なった。広島 DIMM ではなく、教育学部 DIMM で露光時間を変化させて観測した理由は、広島 DIMM と比較したときのシステムの安定性に起因するものである。教育学部 DIMM は、ソ フトウェア起動から約 20 分でシステムが不安定になる傾向が見られた。広島 DIMM もソフトウェア起動後約 50 分あたりで原因不明のエラーが時おり見られることがあ るが頻度は少ない。比較対象にするリファレンスは、作業の便を考えると長時間の 安定した動作が望まれる。このため、両 DIMM を比較し、現時点で長時間観測の可 能である広島 DIMM をリファレンスとして用いた。また、露光時間変化に起因する シーイング観測値の変化は、観測機器の露光時間の設定のみによるものであるので、 教育学部 DIMM の露光変化によって得られる最適積分時間の結果は広島 DIMM に も反映することができ、広島 DIMM をリファレンスに用いても本節の冒頭に述べた 目標は達成される。

露光時間は 1/2000, 1/1000, 1/500/, 1/250, 1/100, 1/60[sec/frame] の 6 種類で行 なった。以下の図は、露光時間を変化させた教育学部 DIMM と、1/2000[sec/frame] で露光した広島 DIMM のシ - イングの時間変化を表したものである。測定は、計 2 回行なった。

これをみると、1回目の露光時間 1/100[sec/frame] における部分の大部分の広島 DIMM のデ - タが欠落している。これは、広島 DIMM のシステムが不安定になった ためにデ - タ取れなくなったものである。デ - タを取る際、常にモニタ - 監視をし ていなかった。このため、システムが不安定になっていることに気がつかなかった。 また、このデ - タ欠落はデ - タ取得から時間の経ったデ - タ解析中に確認されたも のであり、デ - タの再取得は行なうことができなかった。2回目のデータも同様に 1/500[sec/frame] のデータの大半が欠落している。最初の欠落 (JST=22.2 付近) は広



図 4.10: 1月 26日 広島 DIMM(REFERENCE) と教育学部 DIMM の同時シーイン グ観測結果-1回目-

島 DIMM のシステムエラーを発見したため、2回目 (JST=22.4付近)を取り直した が、途中、再びシステムエラーが起こった (JST=22.5付近)。このエラーは再度確認 した 22.6 時に回復されていたため、観測時では発見することはできなかった。

グラフ (図 4.12、4.13) は、積分時間を変更した結果得られた Fried parameter と、 リファレンス (露光時間 1/2000[sec/frame]) の Fried parameter の比をとったもので ある。この Fried parameter 比は、式 (2.24) を参考にして、以下の計算をすることで 得られる。

$$\frac{r_{0\text{EXP}}}{r_{0\text{REF}}} = \frac{\text{FWHM}_{\text{REF}}}{\text{FWHM}_{\text{EXP}}} \tag{4.1}$$

 $(r_{0EXP}: 露光時間変更時の <math>r_0$ 、 $r_{0REF}: 露光時間一定の <math>r_0$ 、 $FWHM_{EXP}: 露光時間 変更時のシーイング値、FWHM_{REF}: 露光時間一定のシーイング値)$

1回目グラフ(図4.12)からは、確かに露光時間を長くすれば、見かけ上シ-イング は良くなる傾向が見て取れる。2回目のグラフ(図4.13)は露光時間1/500[sec/frame] の誤差が大きく、この点は他の露光時間と安易に比較できない。また、2回目に行 なった露光時間変化測定の時間帯(21時中盤~23時前半)は、図4.8を見ればわかる ように、シーイング自体の変動が激しかった時間帯でもある。このために、図4.12 のような露光時間が増えればシーイング値のずれの変化が大きくなる傾向と違った



図 4.11: 1月 26日 広島 DIMM(REFERENCE) と教育学部 DIMM の同時シーイン グ観測結果-2 回目-

傾向が、図 4.13 に現れていると推測されるが、1/500~1/250[sec/frame] で見られる 傾向は露光時間変化とは違った影響によるものと思われる。

よって、2回目の測定により取得したデータは、露光時間と誤差の関係を議論す るには適切ではないと判断し、1回目に取得したデータを用いて以下を議論する。

4.2.4 観測による *r*₀ 比と、モデル *r*₀ 比の比較

これまでは、露光時間 1/2000[sec/frame] を基準に露光時間とシ-イングの依存性 を調べた結果である。しかし、リファレンスとして用いた露光時間 1/2000[sec/frame] によるシーイング値も有限の露光時間を有しており、理想的観測におけるシーイン グ値ではないことに注意しておく必要がある。露光時間の変化により、理想的観 測による値からどの程度ずれるのかを議論することはできないために、露光時間 1/2000[sec/frame] によるシーイング値と理想的観測によるシーイング値の間にどの ような関係があるのか調べてみた。

本来測定されるべきシ-イングの値と露光時間の関係は、Soules(1996)らにより、 以下の式で定義されている。



図 4.12: 露光時間と Fried parameter r₀比-1回目-

$$\frac{r_0(w\tau/d,\alpha)}{r_0(\alpha)} = \left(\frac{\sigma_{\rm dif}^2(w\tau/d,\theta|_{\psi=0}) + \sigma_{\rm dif}^2(w\tau/d,\theta|_{\psi=90})}{\sigma_{\rm dif}^2(0,\theta|_{\psi=0}) + \sigma_{\rm dif}^2(0,\theta|_{\psi=90})}\right)^{-\frac{3}{5}}$$
(4.2)

ここで、w は風速、 τ は露光時間、d はマスク穴口径、 θ は風向と星像ぶれ軸のなす 角度、 ψ はマスク穴間方向と星像ぶれ軸のなす角度、 α は ($\psi - \theta$) と定義されている (図 4.14)。

上式 (4.2) は、マスク穴間方向から α の角度に傾いた軸において、本来求められ るべき Fried parameter $r_0(\alpha)$ と、風速 w、露光時間 τ のもとでの Fried parameter $r_0(w\tau/d, \alpha)$ との比を示している。

また、 $\sigma_{dif}^2(w\tau/d,\theta)$ は以下のように定義されている。

$$\frac{\sigma_{\rm dif}^2(w\tau/d,\theta)}{\sigma_{\rm abs^2}} = \frac{4d^{\frac{1}{3}}}{\pi C} \int_0^\infty q^{-\frac{2}{3}} {\rm somb}^2({\rm qd}) \int_0^{2\pi} \cos^2(\phi-\theta) \\ \times \sin^2[\pi {\rm s}q\cos(\phi-\theta+\psi)] \\ \times {\rm sinc}^2(q\cos(\phi){\rm w}\tau){\rm d}\phi{\rm d}q$$
(4.3)

なお、ここで表されている σ_{abs} は単開口でみたときに結像する像の揺らぎのこと である。また、somb() は sombrero function、sinc() は sampling function と呼ばれ る関数のことである。



図 4.13: 露光時間と Fried parameter r₀ 比-2 回目-

単開口で見た結像揺らぎは、光波面の空間における位相揺らぎ F_{ϕ} に、imaging system 伝達関数 H_A を作用させて得られる F_{abs} を用いて、以下の式で表されている。

$$\sigma_{\rm abs}^2 = \int \int_{-\infty}^{\infty} F_{\rm abs}(\nu_x, \nu_y) d\nu_x d\nu_y$$

$$F_{\rm abs}(\nu_x, \nu_y) = |H_A(\nu_x, \nu_y)^2| F_{\phi}(\nu)$$
(4.4)

νは波数、F_{abs}は単開口の撮像で得られる光波面揺らぎである。

次のグラフ (図 4.16) は、式 (4.3) を数値的に計算したものである。ここではモデル 風速として、星像のぶれ軸の longitudal 方向では $w \ge 2, 4, 6, 8, 10, 12$ [m/s] の 6 種 類、transverse 方向では 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20[m/s] の 8 種類を採用した。風向は、 開口間の軸に対して平行に流れる風を仮定した。また、式 (4.3) から、得られる Fried parameter 比は風向に影響されるが、この度観測により取得した Fried parameter 比 (図 4.12、4.13) は風向に左右されていない値としてみることができる。図 (4.15) は、 transverse 方向と longitudal 方向に測定した FWHM_{tra} 及び FWHM_{lon} の相関をプ ロットしたものである。各方向の FWHM のデ - タ点を FWHM_{tra} = A × FWHM_{lon} でフィッティングしたところ、A = 1.01 ± 0.02 となった。この結果から、高度方向 よる風向は、積分すると等方的と考えてよく、transverse 方向と longitudal 方向とを 区別して評価する必要はないと考えられる。



 \blacksquare 4.14: Schematic geometry of dual-aperture arrangement







図 4.16: 露光時間と Fried parameter r_0 比 上のグラフは transverse 方向 ($\theta = 0$) に、 下のグラフは longitudal 方向 ($\theta = 90$) に星像ぶれ軸を固定した。

図 4.16 に r_0 比 (式 4.2) の実測値とモデル計算値 (式 4.3) の曲線を載せたこれら のグラフのモデル曲線をみると、露光時間が 1/500[sec/frame] より小さい場合には 20[m/sec] 程度までの風速に対して、 r_0 比はほとんど1である。数値的みると、各星 像揺らぎ軸、風速に対してのモデルの露光時間 1/2000[sec/frame] に対応する Fried parameter 比は以下の表 4.3 のようになっている。

風速 w[sec/m]	星像の揺らぎ軸	r_0 ratio $(\tau = 1/2000)$	r_0 ratio $(\tau = 1/60)$
2	transverse	1.001	1.144
4	transverse	1.003	1.356
6	transverse	1.006	1.586
8	transverse	1.009	1.836
2	longitudal	1.000	1.077
4	longitudal	1.001	1.182
6	longitudal	1.003	1.297
8	longitudal	1.005	1.419
10	longitudal	1.007	1.557
12	longitudal	1.009	1.703
16	longitudal	1.013	1.986
20	longitudal	1.017	2.250

表 4.3: 露光時間 1/2000,1/60[sec/frame] と理想的観測時の Fried parameter 比

この表 4.3 をみると、露光時間 1/2000[sec/frame] によって一番大きくずれている風 速 20[m/sec] の Fried parameter 比を見ても 1.017 であり、これは理想的測定における シーイング値と、露光時間 1/2000[sec/frame] によって得られるシーイング値は 2%も 変わらないということを表している。また、露光時間 $\tau = 1/60$ の Fried parameter 比と比べてみると、誤差 2%のずれが無視できるほど小さいものであることがわか る。よって、露光時間 1/2000[sec/frame] によるシーイング値は、理想的観測 (露光 時間 $\tau = 0$) におけるシーイング値とみなしてよい。

4.2.5 シ-イング測定における露光時間の許容範囲

前節は、「露光時間の変化に伴う、理想的測定によるシ - イング値からのずれ」を 表した。

ここで、式 4.2 をみると、露光時間の変化に伴う、理想的なシ - イング測定値か らのずれを評価するためには、モデル風速を考慮しなければならない。これは、上 空の風が一定に流れているという仮定に対応する。

図 4.16 は、風速をある定数に仮定したときの Fried parameter 比である。この図の $r_0(\text{EXP})$ は、今回広島 DIMM と教育学部 DIMM で計測した Fried parameter 比であ り、この値は露光時間の変化に伴う、理想的なシ - イング測定値からのずれであると みなせることを前に述べた。そのように考えると、この図から福成寺上空に流れる風 のおおよその風速を予測することができる。transverse 方向 ($\theta = 0$)の星像ぶれ (図 4.16 上) からは風速 6 ~ 8[m/sec] 間のモデル曲線によくフィットしており、longitudal 方向 ($\theta = 90$)の星像ぶれ (図 4.16 下) では、約 12[m/sec] によくフィットしている。 このことから、この日の福成寺のモデル風速として星像揺らぎ軸が transverse 方向 の時に 7[m/s]、longitudal 方向の時に 12[m/s] をえらぶ。

シーイング測定において我々が知りたいものは、0.1秒角単位のシーイング値であ る。このため、0.05秒角精度のデータ取得がのぞまれる。これは、シーイング典型 値が1秒角以内であるとするならば、系統誤差が最低5%以内でなくてはならないこ とを意味する。

次のグラフ (図 4.17) はモデル風速 7[m/sec](transverse 方向 ($\theta = 0$)) と 12[m/sec](longitudal 方向 ($\theta = 90$)) の露光時間変化による誤差、そして 5%の誤差を目安にプロットした ものである。各モデル風速の選択は、図 4.16 を見て、観測した r_0 比にモデル r_0 比 の曲線がより多く載っているモデル風速を選んだ。

この図をみると、露光時間が約0.002(=1/500)[sec/frame]の箇所で、露光時間に よるエラ - が目標とする誤差を越えていることがわかる。

以上のことから、福成寺でのシ-イング測定時における露光時間は、1/500[sec/frame] 以内に設定する必要があることがわかった。今回の研究においてはほぼ一貫して露 光時間 1/1000[sec/frame]を用いてきたが、これは問題なく、今後もこの値を使用し てよいと考えられる。



第5章 まとめと今後の課題

本研究では、広島大学 1.5m 望遠鏡計画へむけての準備段階として、天体観測時の シーイングモニター (広島 DIMM)の開発を行なった。完成した広島 DIMM は岡山 天体物理観測所において京都 DIMM とキャリブレーションを行ない、広島 DIMM には特に問題がないことを確認した。また、シーイングの測定値に影響する天体の 露光時間の研究も行ない、1/500[sec/frame] 以内での観測において、得られるシーイ ングの値が信用できる値であるということもわかった。このことにより、現在シー イングモニターで採用している露光時間 1/1000[sec/frame] がシーイング測定に有効 な設定であるということも確認した。

次に、広島 DIMM を望遠鏡移設予定値に運び、今回初めて現地でのシーイング 調査を行なった。この結果、1.27 ± 0.12 秒角という値を得、全国トップクラスの良 シーイングサイトであることを確認し、同時に本天文台の観測で良データを取るこ とができることも約束された。

今後の課題としては、今回開発した DIMM を用いて、継続的に移設予定値での シーイングモニターを行なうことである。シーイングは季節などにより変化する。こ のため、移設予定値におけるシーイング変化の傾向を大きなタイムスケールでつか むことは望遠鏡移設後の観測環境維持において大きな情報になる。また、今回の研 究を通して得られた C 言語のスキル、星像位置の情報取得方法などを用いて、オー トガイダーの開発に早期に着手したい。

謝辞

本研究にあたり、氷点下のなか、天文台建設予定地における長時間の観測につき 合っていただいたり、わからない用語、理論等を懇切丁寧に教えていただきました 川端先生に、心から感謝致します。また、数値計算プログラムや解析プログラムの 重要な箇所で助言をいただいた深沢先生にも感謝致します。

環境面におきまして、M2の先輩方の飽きのこない会話のおかげで、夜中も睡魔 に負けず論文作成に打ち込むことができました。小部屋のみなさま、ありがとうご ざいました。

最後になりましたが、事務室で様々な面で研究を支えて下さった上原さん、石井 さんに深く感謝いたします。

関連図書

- [1] 岩田、http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/%7Eiwata/newtel/seemon2/ (2003)
- [2] 上田 篤、天体観測に与える大気の影響とシーイング測定、2003 広島大学修士 論文
- [3] 国立天文台岡山天体物浬観測所 40 周年記念誌 (2001)
- [4] 峰崎、1998年度光・赤外ユーザーズミーティング集録、pp.9-13 (1998)
- [5] 宮下ほか、2003年日本天文学会春季年会、V30b(2003)
- [6] D. B. Soules, J. J. Drexler, and B. F. Draayer.: P.A.S.P. 108, 817-827, 1996 September
- [7] Dierickx, P.: IMAQ 0.7, Diffraction Analysis Software Package, ESO, Nov. 1988
- [8] Fried, D. L.:1965, J. Opt. Soc. Am. 55, No. 11, 1427
- [9] Fried, D. L.:1975, *Radio Science*. 10, No. 1, 71
- [10] Landau, L & Lifschitz, E. Course of Theoretical Physics, Vd. 6, Fluid Mechanics (1959)
- [11] M. Sarazin and F. Roddier.: Astron Astrophys. 227, 294-300 (1990)
- [12] Sky Catalogue 2000.0, Eds. A. Hirshfeld and R. W. Sinnott, Cambridge University Press (1982)
- [13] Tatarski, V. I.: The effect of Turbulent Atmosphere on Wave Propagation, I.P.S.T., Jerusalem (1971)