天体観測に与える大気の影響とシーイング測定

~ 広島大学宇宙科学センター望遠鏡設置場所調査 ~

上田 篤
広島大学大学院理学研究科物理科学専攻
M1479004
高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室

2004 年 2 月 10 日

概 要

地球大気の擾乱などにより、天体光の強度や入射角は光路ごとにわずかに揺らぐ。このため、本来点光源として見えるはずの星像は拡散し、ぼやけた像となる。この現象を定量的に評価するために、星像の良し悪しを指すシーイングという概念が広く用いられている。一般的に星像は点像分布関数 (Point Spread Function) で表され、ガウス分布を回転させた形として近似することができる。このガウス分布の半値幅 (Full Width at Half Maximum) をシーイングサイズと呼び、通常、arcsec (=3600 分の 1 度) を単位とする角度で表記する。良いシーイング環境ほど点像分布関数のピーク値が大きくなるため、暗い天体に対する検出限界が上がる。例えば、シーイングサイズが半分になると、検出限界は 4 倍向上する。シーイングは、観測地の気象条件によって決定される成分 (ナチュラルシーイング)、ドーム内外の気温差やドーム内温度の非一様性による成分 (ドームシーイング)、および望遠鏡の性能やミラー周辺の温度非一様性による成分 (望遠鏡シーイング) の３つの成分で表される。このうち、ドームシーイングと望遠鏡シーイングは人工的に一定の改善を見込むことができるが、ナチュラルシーイングは、人工的な改善はほぼ不可能である。よって、望遠鏡を設置する際には、年間を通じてナチュラルシーイングが優れた環境にある場所を選ぶ必要がある。

本研究では、赤外シミュレーター (口径 1.5 m 光学赤外線望遠鏡) の移設先として最適な場所を決定するために Differential Image Motion Monitor(DIMM) と呼ばれる装置を用いて岡山・広島県の各地においてシーイング測定を行った。DIMM とは、1960 年代初頭に Stock らによりシーイングを評価する手段として開発され、現在ではシーイングを評価する標準的な手法となっている装置である。DIMM は、一定距離離れた二つの光路を通ってきた同一天体の光を望遠鏡に入射させ、別々の星像を作り、それぞれの星像の重心位置の相対的な揺らぎを測定することで大気の乱れ具合を測定する装置であり、駆動上の振動などによるトラッキングエラーや、温度変化による望遠鏡焦点移動の影響を受けないという利点がある。ナチュラルシーイングは、その日の気象条件によっても変化するため、各地とも複数回の測定を試みた。その結果、場所ごとのシーイングの傾向には、明らかな差が見られた。そのうち岡山観測所構内については、風向・風速とシーイングとの比較も行ってみたが、それらの時間変化に明確な相関はみられず、シーイングが複雑な要因を経て決まっていることが示唆される。そして、優れたシーイング状況を示した 2 箇所について、重点的に測定を行うと共に、日照時間など他の観測条件も考慮して、最適地を決定した。

目 次

第 1 章 Introduction **3**

1.1 本研究の目的 3

1.2 赤外シミュレーター移設計画 3

1.3 赤外シミュレーター 5

1.4 ガンマ線バースト 7

第 2 章 大気の乱流 **10**

2.1 シーイングと観測効率 10

2.2 大気の擾乱 12

2.2.1 レイノルズ数 Re 12

2.2.2 Kolmogorov 乱流 13

第 3 章 Differential Image Motion Monitor **16**

3.1 太陽クーデ Differential Image Motion Monitor(太陽クーデ DIMM) . 17

3.2 京都大学 Differential Image Motion Monitor(京都大学 DIMM) . . . 18

3.3 Theory 21

3.4 Fried's parameter r_0 24

第 4 章 サイト調査報告 **25**

4.1 2002 年 岡山天体物理観測所 太陽クーデドームでのシーイング調査 26

4.2 2003 年 岡山天体物理観測所内でのシーイング調査 29

4.2.1 2003 年 5 月 1 日 ~ 2 日 : 太陽クーデ DIMM と京都大学 DIMM の同時測定によるキャリブレーション 30

4.2.2 2003 年 5 月 27 日 ~ 28 日 : 再キャリブレーションと京都大学 DIMM の信頼性確認 38

4.2.3 2003 年 5 月 ~ 8 月の岡山天体物理観測所内でのシーイング測定結果 43

4.3 2003 年 8 月 ~ 12 月広島県でのシーイング測定の結果 44

4.4 福成寺・岡山天体物理観測所における同時シーイング測定 48

4.4.1 岡山における風速、風向とシーイングの関連について 53

4.5 前半夜から後半夜にかけてのシーイングの変動 57

4.6 岡山、広島県の気象条件 58

第 5 章　まとめと考察 **60**
5.1　シーイング測定のまとめ 60
5.2　岡山や福成寺における現実の光波面揺らぎの定量化 62
5.3　赤外シミュレーターの限界等級 63
5.4　シーイングと標高の相関について 65

付 録 A　2003 年 5 月 ~ 8 月の岡山天体物理観測所内でのシーイング頻度と累積割合 **67**

付 録 B　2003 年 8 月 ~ 12 月の広島県内各地でのシーイング頻度と累積割合 **73**

付 録 C　岡山天体観測所における風とシーイングの時間変動 **81**

第1章　Introduction

1.1　本研究の目的

望遠鏡の性能は、集光力と取得された星像の質で決まる。集光力は望遠鏡の口径の 2 乗に比例し、像質に密接な関係を持つ角分解能の大きさは口径に反比例する。よって、望遠鏡の口径を大きくすると、集光力も像質も向上すると期待される。しかし、現実の大口径望遠鏡における星像の質は、理想的な鏡面からのずれや追尾性能といった光学系の不完全性と、大気の擾乱によって光がゆらいでしまう「シーイング」と呼ばれる現象で決まっている。ただし、前者は設計・調整の技術により克服可能である。つまり、大口径望遠鏡では、通常、星像の質はシーイングのみに依っており、本格的な測定用大口径望遠鏡を設置する際には、良いシーイング環境にある場所を選ぶことが重要になる。

本研究の目的は、シーイング環境光害など観測条件の良くない国立天文台三鷹構内に設置されている赤外シミュレーターの移設先として最適な場所を決定することであり、Differential Image Motion Monitor と呼ばれる装置を用いて岡山・広島県の各地においてシーイング測定を行い、その結果に岡山・広島県の気象条件も考慮して、移設最適地を多角的に検討した。

1.2　赤外シミュレーター移設計画

国立天文台三鷹構内にある赤外シミュレーター (口径 1.5 m 光学赤外線望遠鏡) が広島大学に移管されることが 2002 年 10 月に決まり、現在事務手続きが進められている。この赤外シミュレーターは、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。しかし、第一期観測装置の 7 装置はすべて開発が終了して現地で運用されており、シミュレーターとしての需要は減っている。そこで、この望遠鏡を国立天文台三鷹構内からシーイングのよい場所へ移設し、シミュレーター機能を維持しつつ、広島大学を中心に本格的な天文・宇宙研究に有効活用するというプロジェクトが進められている。

赤外シミュレーターを用いた主な研究目的としては、突発・激動天体アラート対応観測を行うことである。具体的には 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 衛星および 2006 年に NASA から打ち上げられるガン

マ線サーベイ衛星 GLAST が突発・激動天体を検出したときに発信する突発・激動天体アラートから天体の座標を取得し、可視光で追跡観測を行う計画である。また、これらの衛星と連携することによって同時多波長観測 (可視 ~ ガンマ線) が可能となり、宇宙における様々な高エネルギー現象の解明に寄与すると期待される。

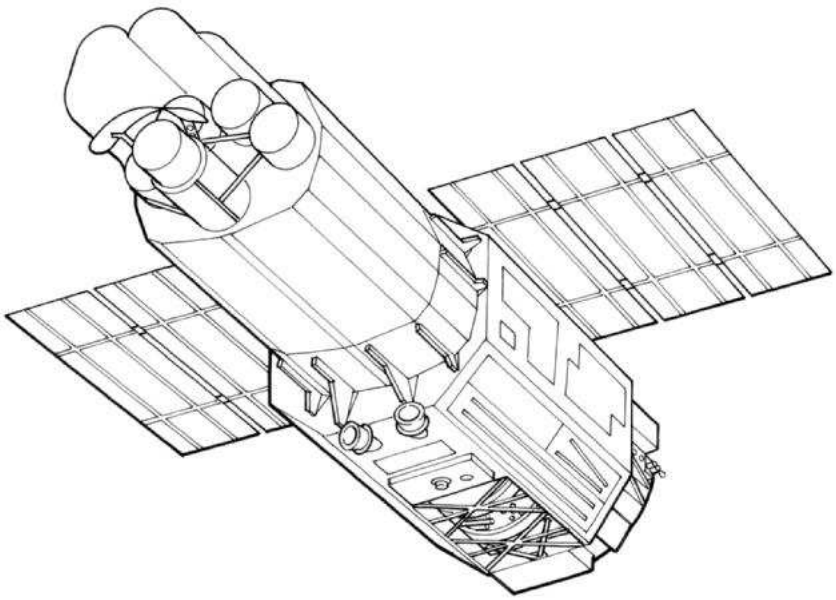

図 1.1: 上 Astro-E2 衛星全体図

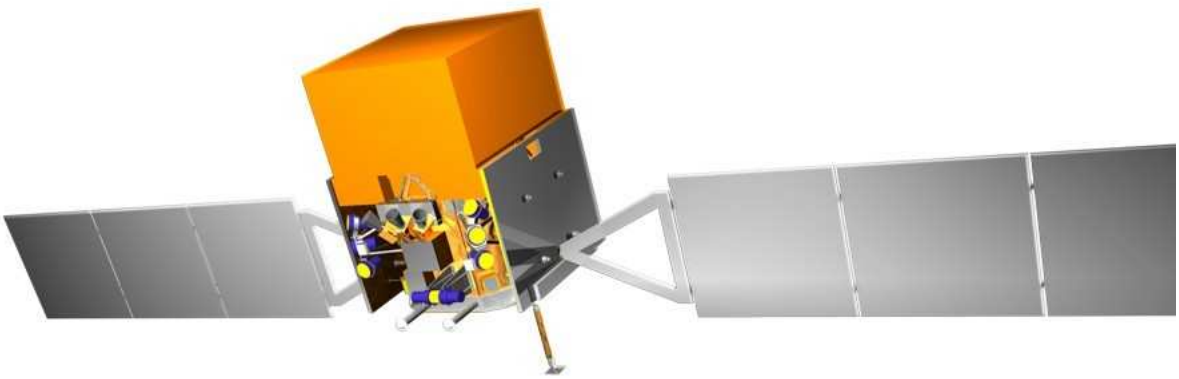

図 1.2: GLAST 衛星全体図

1.3　赤外シミュレーター

赤外シミュレータは、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 1.5 m の本格的な反射望遠鏡である。

以下に赤外シミュレータの全体写真、主要性能、全体図を示す。

図 1.3: 赤外シミュレーターの全体図

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

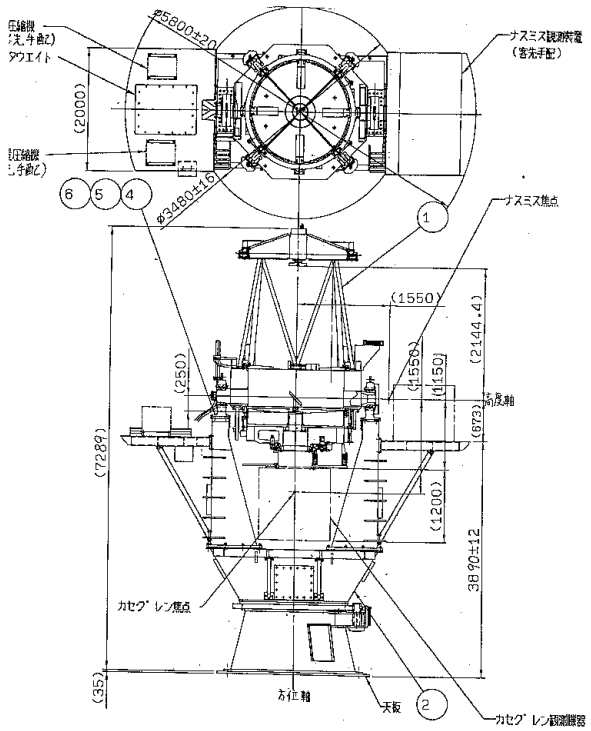

図 1

図 1.4: 赤外シミュレーターの全体図

赤外シミュレーターを用いた場合、10 分間の積分時間で、分光観測では約 17 等級、測光観測では約 20 等級まで観測が可能であると見積もられる。

赤外シミュレーターを用いて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。高エネルギー光子を放射する天体には、可視域でも大きく急激な時間変動を示すものがあり、突発天体とも呼ばれる。従って、現象発見直後の機動的な観測が重要となる。このため、世界中の望遠鏡の中で赤外シミュレーターのみが良い観測機会を得るガンマ線バースト (GRB) 等の突発天体が年間少なからずあると考えられる。将来的には機動性を高めるために赤外シミュレーターとその観測装置のリモート化、全自動化を図り、突発天体発生 1 分以内の観測を目指す。

1.4 ガンマ線バースト

突発天体の一例として、ガンマ線バースト (GRB) がある。GRB とは天球上の一点から、数分の一秒 $\sim$ 数百秒間に亘り大量のガンマ線が降り注ぐ現象である。GRB は 1960 年代に核実験査察衛星によって発見されたが、現象自体が短時間であること、いつ、どこで発生するのか分からないことなどからその正体は謎に包まれていた。しかし、1997 年に GRB の位置情報が即時に流れるようになると、GRB の位置に X 線や可視光、電波などより波長が長い電磁波で急速に減光していく天体が同定されるようになった。これを残光 (afterglow) と呼ぶ (図 1.5)。GRB 残光の即時観測が可能となると、GRB が数十億光年以上という超遠方で起こっていることや、通常の超新星爆発の 100 倍ものエネルギーを放出することなどが次々と分かってきた。過去に可視残光が観測された GRB は 40 例以上あり、GRB 専用の探査衛星である HETE-2 が 2002 年に打ち上げられたこともあり、即応型の GRB 可視光観測が容易になってきた。最近可視光観測された GRB の例としては、GRB 030329、GRB 021004 が挙げられる。GRB 030329 は HETE-2 によって検出され、地上解析により位置情報が決定されて、バーストの約 73 分後には、その位置情報がガンマ線バースト連携ネットワーク (GCN) を通じて世界中に流された。理化学研究所にある 0.25m 望遠鏡では、バーストから 74 分後の R バンド等級として $R = 12.35 \pm 0.07$ が得られている。 (参考文献として、Trii, K., et al., 2003, ApJ, 597, L101) その後の ESO/VLT による分光観測により、赤方偏移は $z = 0.168$ と特定された。 また GRB 021004 では、美星天文台にある口径 1.01 m 望遠鏡のおいて、 バーストから約 2 時間後に R バンドで約 16 等級で観測され、その後の分光観測に より赤方偏移は $z = 2.3$ と特定されている。 このような例から、赤外シミュレーターでもガンマ線バースト残光の測光・分光観測 が十分可能であることが分かる。 また、GLAST が 1 年間に GRB を 200 個程度捕える と予想されることや、過去の GRB の統計において X 線領域では 90 %程度、可視領域 ではその半分程度が観測されていること、および規模・時刻帯・晴天率等を 考慮すると、年間 10 個程度はこの赤外シミュレーターで観測することができると予想される。

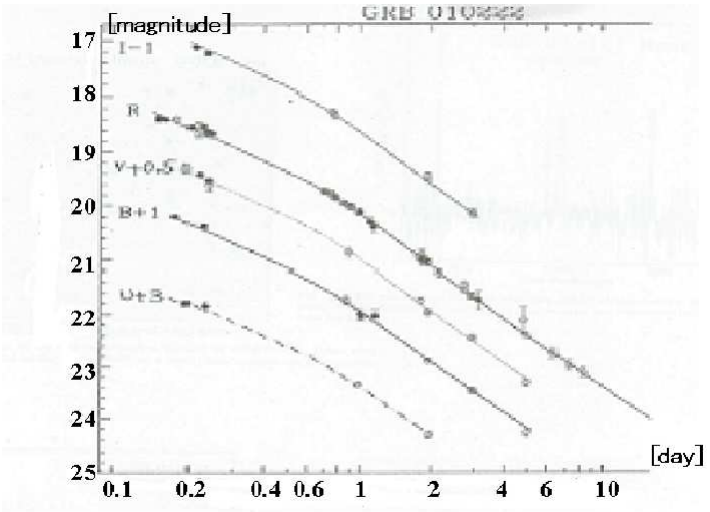

図 1.5: GRB の afterglow の観測例 [Rapid UBVRI follow up of the highly collimated optical afterglow of GRB 010222,Krzysztof Z.Stanek]

GRB 以外の突発天体としては、X 線フラッシュや X 線トランジェントが挙げられる。

X 線フラッシュ

X 線フラッシュは、継続時間や発生頻度は GRB と似ているが、スペクトル・エネルギー分布において X 線領域に放射のピークがある天体を指し、ここ 3 年ほどでようやくその存在が知られてきた。可視領域で残光とみられる天体が同定された例は、まだ XRF 030723 の一つだけで、赤外シミュレーターでも GRB に続く重要な観測対象となると思われる。

X 線トランジェント

X 線トランジェントは、文字通り X 線で急激に輝く天体であるが、その中でも X 線フレアと呼ばれる特に明るい現象を示すものがある。X 線トランジェントは一般に、ブラックホールや中性子星を伴う近接連星系において、伴星の外層大気が間欠的にブラックホールや中性子星に落ち込むことによる現象ではないかと考えられている。X 線フレアが起こった場合は、可視光でも比較的長く続く増光が観測されている (図 1.6)。よって、X 線トランジェントに対しては、GRB や X 線フラッシュと違い、長期間 (~ 1ヵ月) の観測・追跡が必要となる場合がある。GRB ほどの即時性は求められないものの、継続的な観測に対する柔軟性が必要となろう。この点においても赤外シミュレーターという独自の望遠鏡を利用できる意義

は大きい。

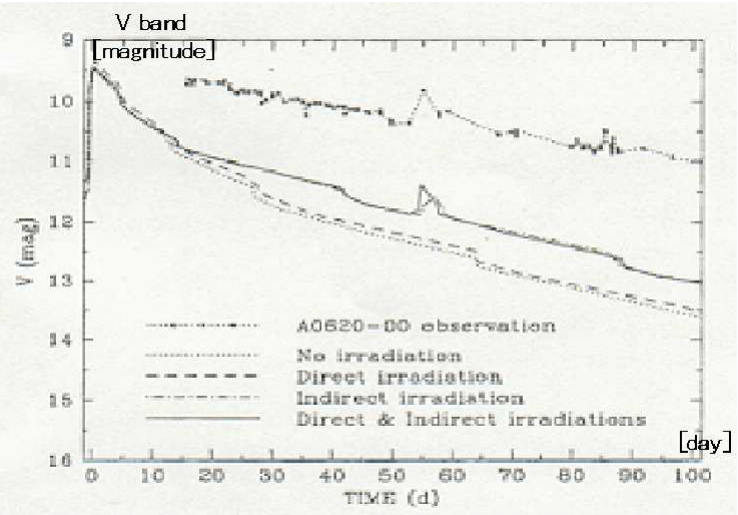

図 1.6: X 線トランジェント天体の light curve の観測例 [Black-Hole X-ray Transients:The Effect of Irradiation on Time-Dependent Accretion Disk Structure,Soon-Wook KIM]

第2章　大気の乱流

2.1　シーイングと観測効率

地球大気の擾乱などにより、天体光の強度や入射角は光路ごとにわずかに揺らぐ。このため、本来点光源として見えるはずの星像は拡散し、ぼやけた像となる。この現象を定量的に評価するために、星像の良し悪しを指すシーイングという概念が広く用いられている。大口径望遠鏡の性能は、例えば望遠鏡の光学系が完全であった場合、取得された星像の質はほとんどシーイングだけで決まるので、良いシーイング環境にある場所を選ぶことが本質的に重要になる。一般的に星像は点像分布関数 (point-spread function) で表され、ガウス分布を回転させた形として近似することができる。つまり、星像の半径 r 方向の intensity 分布 $I(r)$ は、原点を中心とするガウス分布 $G(r)$ で表され、

$$I(r) = G(r) = A \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{\sigma}\right)^2\right] \qquad (2.1)$$

A : ガウス分布のピーク値

となる。星像の全 flux f は、$I(r)$ を全空間に亘り積分することで得られる。つまり、

$$f = \int_0^{2\pi}\int_0^{\infty} I(r) r\, dr d\theta = \int_0^{2\pi}\int_0^{\infty} A \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{\sigma}\right)^2\right] r\, dr d\theta = 2\pi\sigma^2 A \qquad (2.2)$$

と表される。f が一定であれば、peak intensity A は σ の 2 乗に反比例する。

一方、シーイングは通常、このガウス分布の半値幅 (FWHM; full width of half maximum) で表される。よって、大気による減光が一定で星から届く全光量が不変であれば、シーイングが良くなる (= FWHM が小さい) ほど、ピーク値 A が大きくなることになる。ピークで明るく輝くほど検出限界は上がり、細スリットを用いた分光観測にも有利であるため、シーイングの良し悪しは観測効率と直結する重要なパラメーターであることが分かる。FWHM と σ の関係はガウス分布の式から以下の式で表される。

$$FWHM = 2.36\sigma \qquad (2.3)$$

一方、天文学ではフラックス f を等級に換算して用いられることが多い。上記の intensity I も広義のフラックスとみなすことができる。二つの $I_1,\ I_2$ に対する等級をそれぞれ、$m_1,\ m_2$ とおくと、ポグソンの式は、

$$m_1 - m_2 = 2.5 \times \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \tag{2.4}$$

と表される。シーイングが 1.0 arcsec から 1.1 arcsec に変化した場合、式 (2.2)、(2.4) から、peak intensity は 20 %ほど暗くなり、等級でも約 0.2 等級暗くなる。つまりシーイングが 10 %悪くなるだけで、望遠鏡の検出限界が 0.2 等級悪くなる。これは望遠鏡の口径が 10 %小さくなることに相当する。本格的な望遠鏡を設置するにあたり、シーイングが良い場所を選ぶことは、本質的に重要であることがわかる。

シーイングは、以下の 3 つの成分の合成で表される。

ナチュラルシーイング

観測地の気象条件によって決定されるシーイング成分で、望遠鏡を囲うドームの外側で決定されるものをすべて含む。地形や気候などにより、場所毎に大きな差がでる場合もある。特に、地表付近では植生や建物の影響も受け易いことが知られている。

ドームシーイング

ドーム内外の温度差揺らぎの影響やドーム内の温度不均一による温度揺らぎを受ける成分で、ドームの形状や、開口方向と風との関係、構造物の熱収支などに依存する。

望遠鏡シーイング

望遠鏡の結像性能や追尾能力・振動等の機械精度、ミラー周辺の温度差揺らぎの影響を受ける成分で、望遠鏡の完成度やドーム内大気との温度不均一に依存する。

このうち、ドームシーイングと望遠鏡シーイングは人工的に一定の改善を見込むことができるが、ナチュラルシーイングは人工的な改善はほぼ不可能である。よって、望遠鏡を設置する際には年間を通じてナチュラルシーイングが優れた環境にある場所を選ぶ必要がある。

2.2　大気の擾乱

地球大気は、屈折率が時間的・空間的に不規則に変動しており、これを擾乱 (turbulence) と呼ぶ。屈折率が場所ごとに異なると、天体からの光の波面が乱されて星像がゆらぐ原因となる。大気の屈折率は温度に大きく依存するため、擾乱は主として大気中の温度分布が一様でないために生じる。

太陽から与えられる熱量は地上の場所ごとに異なるので、大気中の 1 m から 1 km といった大きなスケールの温度分布、すなわち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。これが天体から伝搬する光波面の変動を引き起こし、天体望遠鏡の角分解能を低下させる原因となる。天体観測の場合には、擾乱の少ない大気に対してこのかたまりのスケールは約 10 cm、継続時間が 10^{-3} ~1 秒というのが大雑把な見積もりである。(参考文献:[17])

2.2.1　レイノルズ数 Re

流体力学において、流れを特徴づけるもっとも重要な無次元のパラメーターとしてレイノルズ数 Re がある。
レイノルズ数 Re は一般的に以下のように定義される。

$$\begin{gathered}\frac{v_{\mathrm{t}} l}{\nu} = Re_{\mathrm{t}} \\ v_{\mathrm{t}}\text{: 流れの速度 (m/s)} \\ l\text{: 乱流スケール (m)} \\ \nu\text{: 大気の動粘度}\end{gathered} \tag{2.5}$$

この Re_{t} は遷移レイノルズ数と呼ばれる。

流れが一様で規則的な流れを保つためには、そのスケール (例えば円管内の流れを考えた場合、その円管の半径) を l_0 とおくと、

$$Re_t = \frac{v l_0}{\nu} < Re_{\mathrm{cr}} \tag{2.6}$$

が成り立つ必要がある。ここで Re_{cr} は臨界レイノルズ数である。Re_{cr} は無次元の数であり、実験機材の配置や条件によって決まる。この式が成り立つ場合つまり、遷移レイノルズ数が臨界レイノルズ数より小さい場合、流れは層流 (laminar flow) 状態にあり、安定している。逆に遷移レイノルズ数が臨界レイノルズ数より大きくなる場合、流れが不安定になり、乱流 (turbulent flow) 状態に移行する。

大気が 20 ℃の場合、v_{t}=1 m/s、L_0=15 m、$\nu = 15 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ であると仮定すると、遷移レイノルズ数は $Re_{\mathrm{t}} = 10^6$ となる。一般的に Re_{cr} は約 $2 \times\ 10^3$ なの

で、この大気中では乱流が完全に発達していると考えられる。(参考文献:[18])

2.2.2 Kolmogorov 乱流

乱流の統計的理論は、1935 年頃に Taylor によって唱えられ、von Karman や A.N.Kolmogorov によって基礎が確立された。これは、乱流の本質を明らかにするために、流体の運動方程式であるナビエ・ストークス方程式に統計的処理を施し、乱流を特徴づける量 (スケール、強さ) の空間的分布や時間的消長を定めるものである。現在のところは通常、一様等方性乱流、すなわち乱流の構造が方向性を持たず、かつ時間的に変化しない場合について研究が進められている。

地球大気を観測的に扱う場合、一般に地球大気の擾乱を Kolmogorov 乱流によると仮定する。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、遷移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。Kolmogorov は乱流のスケールを表すのに、L_0 や l_0 の代わりに波数 κ を用いた。つまり $\kappa_{L_0} = \frac{2\pi}{L_0}$、$\kappa_{l_0} = \frac{2\pi}{l_0}$ となる。Kolmogorov は $\kappa_{L_0} < \kappa < \kappa_{l_0}$ の広い波数領域で成り立つ統計的な法則に到達した。この領域は慣性小領域と呼ばれる。慣性小領域では、$Re_{\mathrm{t}} > Re_{\mathrm{cr}}$ 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} へどんどん乱流スケールが細かくなっていく。(図 2.1 参照)

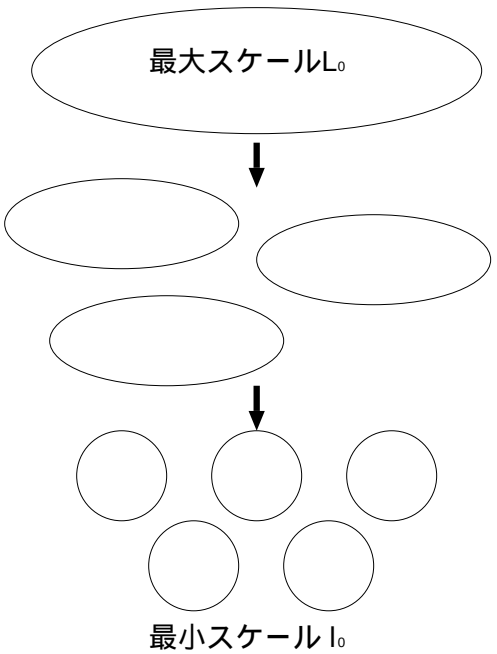

図 2.1: Kolmogorov 乱流のイメージ

乱流の発端になる最大の乱流スケールの寸法 L_0 は、地形やその放射特性によって決まる。具体的には、地表が熱せられるために生じる対流と、L_0 よりも小さい範囲で風速が一様であるという、地形に起因する原因が重なって L_0 が決まる。したがって、$l \approx L_0$ の間は乱流は等方性を示さない。しかし、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十分に予想できる。(図 2.1) これをコルモゴロフの局所的等方性の仮定という。これにより一様な等方性乱流として、地球大気を統計的に扱うことが可能になる。

ここで、$\boldsymbol{x}$ 点での屈折率 $n(\boldsymbol{x})$ を、空間平均値 $\langle n \rangle$ からの変量 $\Delta n(\boldsymbol{r})$ を用いて表すことができる。つまり、$n(\boldsymbol{x}) = \Delta n(\boldsymbol{x}) + \langle n \rangle$ である。この場合、$\boldsymbol{x}$ 点の屈折率変量と、$\boldsymbol{x}$ 点からほんの少し離れた $\boldsymbol{x} + \boldsymbol{r}$ 点での屈折率変量との間の構造関数 (structure function) は、以下のように書くことができる。

$$D_n(\mathbf{r}) = \langle |\mathbf{n}(\mathbf{x}+\mathbf{r}) - \mathbf{n}(\mathbf{x})|^2 \rangle \tag{2.7}$$

ここで、$\langle\rangle$ は空間変数 $\mathbf{x}$ に亘る平均を表す。

慣性小領域中では、乱流のスケール l 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。よって局所的な乱流速度 υ 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、υ はその塊のスケール r と密度 ρ、およびエネルギー転換率 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、$\upsilon \propto (\varepsilon r)^{\frac{1}{3}}$ の形に書くことができる。(Landau,L&Lifschitz,E.(1959)Course of Theoretical Physics,Vd.6,Fluid Mechanics) このことから、$\boldsymbol{x}$ 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。

$$D_\upsilon(r) = \langle |\upsilon(x+r) - \upsilon(x)|^2 \rangle = C(\varepsilon r)^{\frac{2}{3}}, l_0 \ll r < L \tag{2.8}$$

ここで C は無次元の定数である。以上は速度揺らぎに関する話である。一方、温度勾配が断熱的なものからずれた大気中で A.M.Obukhov(1949, Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geor. Geofiz. 13, 58) 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 の法則に従うことを示した。つまり、速度揺らぎも温度揺らぎも類似の式により支配されることになる。

V. I. Tatarski(参考文献:Wave Propagation in a Turbulent Medium, McGraw-Hill(1961)) は、(2.8) 式に対応する屈折率揺らぎの構造関数として

$$D_n(r) = \langle |n(x+r) - n(x)|^2 \rangle = C_n^2 r^{\frac{2}{3}}, l_0 \ll r < L \tag{2.9}$$

を与え、流体力学の問題を光学の問題に移しかえて、それまでは現象論の域を出なかった、大気擾乱中の光の伝搬理論を、強固な物理的基礎をもつ理論にまで

高めた。ここで、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。

Fried によると、波面構造関数は (2.10) 式のように表される。

$$\begin{gathered} D(r) = D_\chi(r) + D_\phi(r) \\ D_\chi : log - amplitude \text{ 構造関数} \\ D_\phi : \text{位相構造関数} \end{gathered} \tag{2.10}$$

ここで (The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy §7) より、$D_\chi(r)$ の値は $D_\phi(r)$ に比べて十分小さいので、(2.11) 式のように書くことができる。

$$D(r) \cong D_\phi(r) \tag{2.11}$$

コロモゴロフの局所的等方性の仮定において、波面構造関数は求められており (Tatarski,1961)、結局次のように表されることになる。

$$D_\phi(r) \cong D(r) = 6.88 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \tag{2.12}$$

この Kolmogorov の考え方はいろいろな仮定の上に立っているが、様々な実験結果とよく一致し、現実をよく表していることが知られている。

第3章　Differential Image Motion Monitor

シーイングが、地上からの天体観測にとって大切なパラメーターの 1 つであることは前章で述べた通りである。望遠鏡を建設する際には、シーイング調査を系統的に行い、ナチュラルシーイングが良い場所を選ぶことが重要である。ナチュラルシーイングは大気の接地境界層や、望遠鏡の周辺、自由大気の影響を受けて変動する。

1960 年代初頭に、Stock(Stock, J. & Keller, G. .1960, Astoronomical Seeing) らにより、シーイングを評価する手段として、Differential Image Motion Monitor(DIMM) が開発された。DIMM は実際に光学的な観測をすることによってシーイングを見積もることができ、かつ駆動上の振動などによるトラッキングエラーや、温度変化による望遠鏡焦点移動の影響を受けない利点がある。DIMM は、同一の天体に対して、地球大気中の近接する 2 つの光路を通ってきた天体光を用いて別々の星像を作り、その星像の運動を相対的に測定する装置である。この時、二つの星像の相対的な運動は、大気乱流の時定数よりも短い露出時間で測定する必要がある。測定結果は、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、その方向ごとに求める (図 3.1 参照)。DIMM により得られる星像運動は、2 つの開口間の距離と、その口径とシーイングによって決まる量であり、結果としてシーイングを定量的に導出することができる。

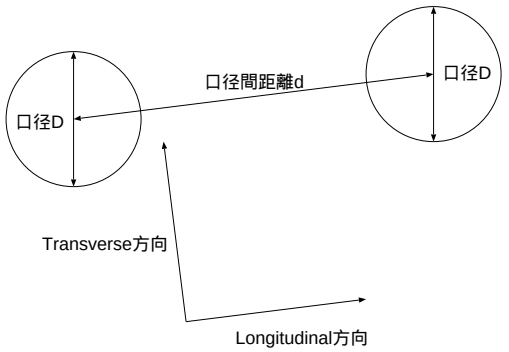

図 3.1: DIMM の模式図

3.1 太陽クーデ Differential Image Motion Monitor(太陽クーデ DIMM)

太陽クーデ Differential Image Motion Monitor は、国立天文台岡山天体物理観測所構内に設置されている太陽クーデ望遠鏡に DIMM(高遠・浦口シーイングモニター) を同架したものである。この装置を使用することにより、太陽クーデ設置場所における、望遠鏡の振動以外の要素 (ドームシーイングやナチュラルシーイング等) で決まるシーイングを求めることができる。

高遠・浦口シーイングモニターは、二つの独立した望遠鏡それぞれに CCD が取り付けられており、同時に 2 枚の画像を取得する。このとき二つの画像の同期を取るために、同期信号発生回路からジャンクションボックスを介して CCD コントローラーに垂直/水平同期信号を入力する。2 枚の画像はマルチビュワーで 1 枚の画像に合成される。合成された画像は、ビデオキャプチャーカードによって、PC に取りこまれる。PC は、専用のソフトウェアを用いて、画像を連続的に取得する。各フレームに写っている二つの星像のそれぞれの重心を自動的に検出し、星像間の相対的な位置を求め、その相対位置の最新 50 フレーム中での変化の標準偏差 σ を出すことにより、シーイングを求める。1 フレーム得るたびに、最新の 50 フレームで新たに σ を求め直す。

以下にこの高遠・浦口シーイングモニターの全体像とシステム概要、スペックを載せておく。

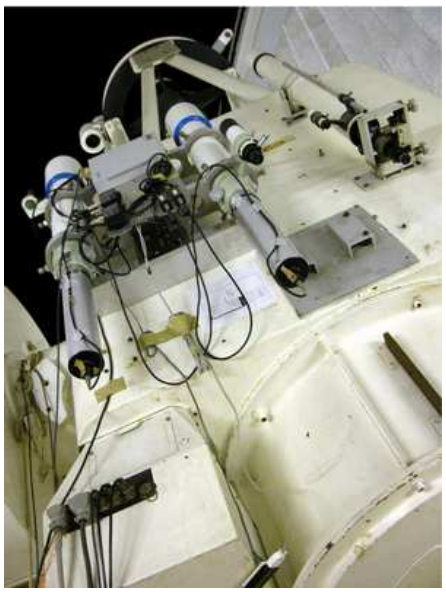

図 3.2: 太陽クーデ Differential Image Motion Monitor

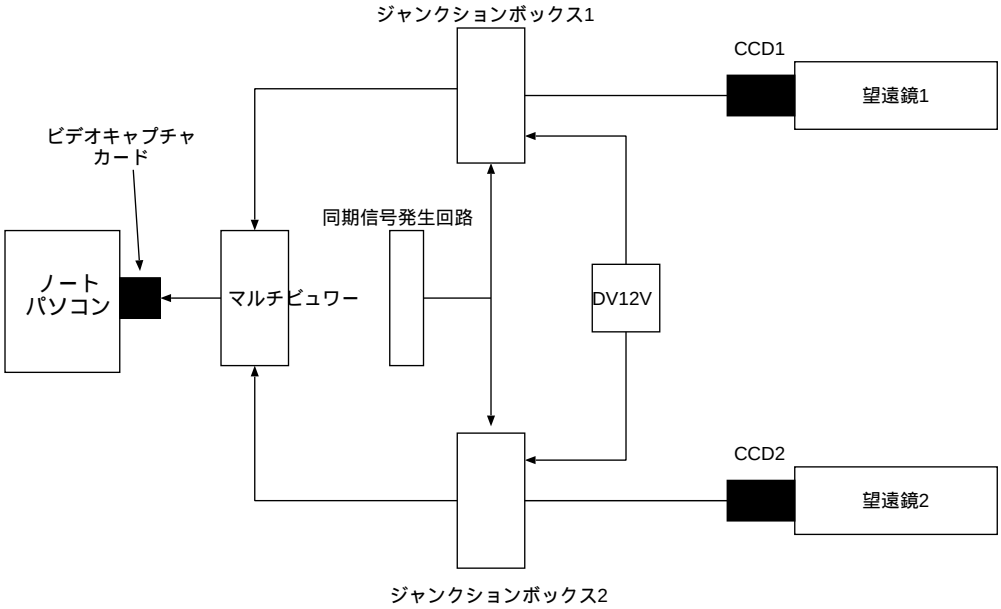

図 3.3: 太陽クーデ Differential Image Motion Monitor のシステム図

口径	10cm
口径間距離	50cm
寸法	1,196 × 660 × 210mm (ファインダー除く)
重量	約 35kg
空間分解能	0.0956(左)、0.0967(右) arcsec/pixel
視野	31.6 × 47.4arcsec(× 2)
検出限界	約 3 等級
ビデオレート	1/30 秒
サンプリングレート	1/2 秒
積分時間	1/100 秒

今回使用した高遠・浦口シーイングモニターは、同型のものが国立天文台ハワイ観測所 (すばる望遠鏡) でも利用されている。

3.2 京都大学Differential Image Motion Monitor(京都大学DIMM)

京都大学 Differential Image Motion Monitor は、京都大学新望遠鏡ワーキンググループによって開発された口径 20cm の自動追尾型の望遠鏡を用いた、持ち運び可能なシーイング モニターである。この望遠鏡や架台は可搬型であり、望みの場

所に設営してナチュラルシーイングを測定することができる。(装置の総重量は約 50kg、装置を設置、観測を開始するまでに 30 分程度かかる。) また、ドーム内に設置して、望遠鏡に同架された DIMM と同時に 測定を行えば、望遠鏡の振動以外の要素 (ドームシーイングやナチュラルシーイング) で決まるシー イング成分を求めることができる。

京都大学 DIMM は、 1 つの望遠鏡の入光部に二つの穴をあけた覆いをし、そのうち一方の穴にはウェッジ・プリズムを追加してやることにより像を結ぶ位置を変え、1 つの CCD 上に同じ天体の像が 2 つ写るようにする。画像は ADVC (アナログビデオとデジタルビデオを双方向に変換するボックス型のコンバーター) を用いてアナログ出力をデジタル出力に変換し、Firewire というインターフェイスを介して PC に取りこまれる。そして、高遠・浦口シーイングモニター同様に、PC が専用のソフトウェアを用いて画像を連続的に取得する。各フレームに写っている二つの星像それぞれの重心はソフトウェアによって自動的に検出される。 その星像間の相対的な位置の最新 50 フレーム中での変化 (=星像重心の運動) の標準偏差 σ を測定することにより、シーイングを求める。

このシーイングの求め方について、開発当初は、太陽クーデ DIMM と同様に 1 フレーム得るたびに、一番古い画像を捨てて、最新の 50 フレームで σ を求めるという方法を用いて、連続的にシーイングを求めていた。しかし、この方法を用いると、1 フレームでもなんらかの影響 (星が薄雲に隠れる等) を受けて正確なデータが得られなかった場合、図 4.3 のシーイングの時間変動のグラフようにシーイングの値が縦方向に連続的に広がってしまい、正しい理解を妨げる原因となる。これを改善するために、5 月 2 日のシーイング測定後、ソフトウェアが改良された。これは、画像を 50 フレーム取得して σ を一回求めたら、その 50 フレームの画像はすべて捨て、新たに 50 フレームを取得し直して、次の σ を求めるという方法を用いている。この結果図 4.15 のように、1 フレーム程度のマイナーな取得不良 (ノイズ) による影響も格段に減り、より正確な測定を行えるようになった。この方法の欠点は、一度 50 フレーム取得し、計算するのに 20 秒前後かかってしまうので、データ点数が減り、非常に短いシーイングの時間変動の追尾ができないことであるが、時間分解能の点では両者とも同じである点に注意する必要がある。我々の目的は大局的なナチュラルシーイングの値を知ることであるため、1 分以内の時間分解能は必要としておらず、この設定で十分である。

以下にこの京都大学 DIMM の全体像とシステム概要、スペックを載せておく。

図 3.4: 京都大学 Differential Image Motion Monitor

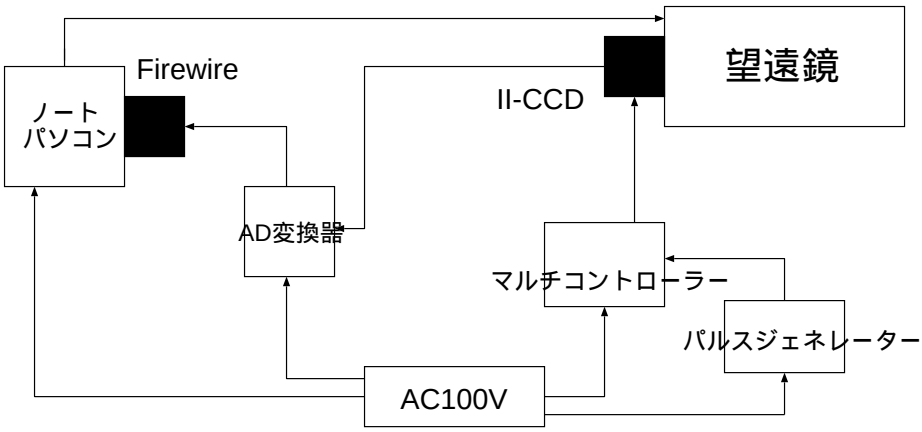

図 3.5: 京都大学 Differential Image Motion Monitor のシステム概略図

口径	5cm
口径間距離	14.4cm
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
ビデオレート	1/30 秒
サンプリングレート	1 秒 (5 月 2 日まで)
	20 秒前後 (5 月 27 日以降)
積分時間	1/150 秒

3.3 Theory

Differential Image Motion Monitor では、光学的な観測をすることにより、シーイングを求める。以下では、DIMM によって得られる星像の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、

$$z(x,y) = \frac{\lambda}{2\pi}\phi(x,y) \tag{3.1}$$

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 (=angle-of-arrival fluctuation) を、X 方向、Y 方向でそれぞれ α、β とおくと、

$$\begin{aligned} \alpha(x,y) &= -\frac{\partial}{\partial x}z(x,y) = -\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)\frac{\partial}{\partial x}\phi(x,y) \\ \beta(x,y) &= -\frac{\partial}{\partial y}z(x,y) = -\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)\frac{\partial}{\partial y}\phi(x,y) \end{aligned} \tag{3.2}$$

となる。この変動はガウス分布に従う。

α の共分散を以下の式で定義する。

$$B_\alpha(\mu,\eta) = \langle \alpha(x,y)\alpha(x+\mu, y+\eta)\rangle \tag{3.3}$$

ここで、$(\mu,\ \eta)$ は、$(x,\ y)$ からの位置のずれの量を表す。この共分散 B_α は、α の空間的に離れた点どうしの関連、すなわち、α の観点から乱流中にどの程度秩序があるかということを表す量とみなすことができる。

ここで、$B_\alpha(\mu,\eta)$ は、位相変動の共分散 $B_\phi(\mu,\eta)$ と以下のように関係づけられる。

$$B_\alpha(\mu,\eta) = -\frac{\lambda^2}{4\pi^2}\frac{\partial^2}{\partial\mu^2}B_\phi(\mu,\eta) \tag{3.4}$$

地球大気を通過して来た光線は大気の屈折率によって揺らぎ、光波面をランダムに凸凹にしてしまう。この光波面の凸凹の構造を定量的に表現する物理量として位相構造関数が定義されている。

$$\begin{gathered} D_\phi(\mathbf{r}\ ) = \langle|\phi(\mathbf{x}+\mathbf{r}) - \phi(\mathbf{x})|^2\rangle \\ \phi(\mathbf{x}) : \mathbf{x}\text{ での位相のずれ量 } \langle\rangle : \text{全空間にわたる平均を表す} \end{gathered} \tag{3.5}$$

これは、開口面上で距離 $\mathbf{r}$ 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、$D_\phi(r)$ は 2 つのスポット間の位相差 $\delta\phi(r) = \phi(x+r) - \phi(x)$ の分散であることが分かる。空間に対する位相の変動は (3.2) 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。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。つまり、長時間露光した星像の広がり (FWHM) は、(3.2) 式に対応する分散で表せると期待できる。

$r = (\mu, \eta)$ 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。

$$D_\phi(\mu,\eta) = 2[B_\phi(0,0) - B_\phi(\mu,\eta)] \tag{3.6}$$

これと B_α の式より、

$$B_\alpha(\mu,\eta) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2}\frac{\partial^2}{\partial\mu^2}D_\phi(\mu,\eta) \tag{3.7}$$

(2.10) 式で示したように、Kolmogorov の理論により、以下の表記が得られる

$$D_\phi(r) = 6.88\left(\frac{r}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \tag{3.8}$$

ここで r_0 は Fried parameter とよばれ、シーイングの質を表すパラメーターである。この表現は慣性小領域中でのみ有効である。すなわち $l \ll r \ll L$ （Ref. §2.2.2）。また、$r = \sqrt{\mu^2+\eta^2}$ である。

D_ϕ を B_α の式に代入すると、

$$\begin{aligned} B_\alpha(\mu,\eta) &= \left(\frac{\lambda^2}{8\pi^2}\right)\frac{\partial^2}{\partial\mu^2}D_{\phi_0}(\mu,\eta) \\ &= 0.087\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}}\frac{\partial^2}{\partial\mu^2}[\mu^2+\eta^2]^{\frac{5}{6}} \\ &= 0.145\lambda^2 r_0^{\frac{5}{3}}\left[(\mu^2+\eta^2)^{-\frac{1}{6}} - \frac{1}{3}\mu^2(\mu^2+\eta^2)^{-\frac{7}{6}}\right] \end{aligned} \tag{3.9}$$

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

$$B_l(d) = B_\alpha(d, 0) = 0.097 \left(\frac{\lambda}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{\lambda}{d}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{3.10}$$

また、$\mu = 0$ とすると、transverse 方向の距離 $\eta = d$ での共分散が以下のように得られる。

$$B_t(d) = B_\alpha(0, d) = 0.145 \left(\frac{\lambda}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{\lambda}{d}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{3.11}$$

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 を 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。

$$B_\alpha(0, 0) = 0.179 \left(\frac{\lambda}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{\lambda}{D}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{3.12}$$
$$D : \text{口径}$$

以上のことから、口径間距離 d に関する Differential image motion の分散は以下の式で与えられる。

$$\sigma^2(d) = 2[B(0) - B(d)] \tag{3.13}$$

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

$$\sigma_l^2 = 2\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} [0.179 D^{-\frac{1}{3}} - 0.0968 d^{-\frac{1}{3}}] \tag{3.14}$$

d>2D の時、transverse 方向の分散 σ_t^2 は

$$\sigma_t^2 = 2\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} [0.179 D^{-\frac{1}{3}} - 0.145 d^{-\frac{1}{3}}] \tag{3.15}$$

上の式から、ある 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's parameter r_0 を評価できることができることがわかる。

一方、シーイングは通常、星像分布関数 (Point Spread Function; PSF) の半値幅 (FWHM) で表される。r_0 と、PSF の半値幅との間には、Dierickx (1988) によって

長時間露光した場合の星像を数値的にシミュレーションすることで、以下の関係が与えられている。

$$FWHM = 0.98\frac{\lambda}{r_0} \tag{3.16}$$

この式を用いることによって、Fried's parameter から FWHM(シーイング) を求めることができる。

3.4 Fried's parameter r_0

Fried's parameter r_0 は、星像の良し悪しを表すパラメーターとみなすことができる。望遠鏡の口径 D が Fried's parameter r_0 より小さい時の分解能は、望遠鏡によって制限される。また、望遠鏡の口径 D が r_0 より大きい時の分解能は、大気によって制限される。つまり r_0 の値が大きいときはシーイングが良いことを意味し、小さいときはシーイングが悪いことを意味している。Fried's parameter r_0 は以下のように定義されている。

$$\begin{gathered} r_0 = \left[0.423k^2(\cos\gamma)^{-1}\int dh \cdot C_n^2(h)\right]^{-\frac{3}{5}} \\ C_n^2(h) : \text{屈折率の構造関数 (高さの関数)} \\ k = \frac{2\pi}{\lambda} \end{gathered} \tag{3.17}$$

このように r_0 は天頂角 γ と波長 $\lambda = 2\pi/k$ に依存する。r_0 と波長の依存性は以下の式で与えられる。

$$r_0 \propto (\lambda^{-2})^{-\frac{3}{5}} = \lambda^{\frac{6}{5}} \tag{3.18}$$

これは Boyd、Selby、Wade、Magro らによって経験的に確かめられている。世界中の典型的な観測サイトにおける r_0 の値は、2 cm から 20 cm の間である。r_0 の値より望遠鏡の口径のほうが大きいので、望遠鏡の分解能は常に大気によって制限されていることが分かる。観測所を設けるには、ナチュラルシーイングが良い場所を探すことが重要になるゆえんである。

第4章　サイト調査報告

我々は、2002年夏から2003年冬にかけて、太陽クーデDIMMと京都大学DIMMを用いて、赤外シミュレーター移設候補地を決定するために、広島・岡山両県においてシーイング調査を行った。測定を行った場所と日を、表4.1に掲げる。

表 4.1: 2002、2003年シーイング結果

場所	測定日	場所	測定日
太陽クーデドーム	2002年7月31日	移設候補地	2003年8月2日
太陽クーデドーム	2002年8月1日	広島大学教育学部屋上	2003年8月6日
太陽クーデドーム	2002年8月2日	広島大学理学部屋上	2003年9月16日
太陽クーデドーム	2002年8月13日	広島大学理学部屋上	2003年9月17日
太陽クーデドーム	2002年8月19日	板鍋山	2003年9月26日
太陽クーデドーム	2002年8月21日	板鍋山	2003年10月8日
太陽クーデドーム	2002年8月22日	福成寺	2003年12月1日
太陽クーデドーム	2002年9月2日	保野山	2003年12月2日
太陽クーデドーム	2002年9月5日	福成寺	2003年12月3日
太陽クーデドーム	2003年5月1日	保野山	2003年12月4日
太陽クーデ・移設候補地	2003年5月2日	福成寺	2003年12月8日
太陽クーデドーム	2003年5月27日	福成寺	2003年12月10日
太陽クーデドーム	2003年5月28日	福成寺	2003年12月14日
DIMMドーム	2003年5月29日	福成寺	2003年12月16日
CT	2003年7月31日	福成寺	2003年12月17日
CT	2003年8月1日	福成寺	2003年12月24日

本章では、その結果を報告するとともに、個々の結果に対しての考察を行う。全体の考察は次章で行う。

4.1 2002年 岡山天体物理観測所 太陽クーデドームでのシーイング調査

2002年7月29日~9月24日の期間を、岡山天体物理観測所シーイングキャンペーン期間として、太陽クーデドーム内に設置した太陽クーデDIMMを用いて、重点的にシーイング測定を行った。

太陽クーデドーム周辺でシーイング調査を行った理由は、2002年夏時点で赤外シミュレーターの移設候補地として有力であったことと、太陽クーデドーム内に設置されている太陽望遠鏡は現在使われていないため、自由に使うことができるからである。計算方法は§3.3 Theoryに準じ、DIMMのソフトウェアでFried's parameterを求めて以下の式に代入することにより、シーイングを評価する。λは可視測定光の中心波長である550 nmとする。

$$FWHM = 0.98\frac{\lambda}{r_0} \tag{4.1}$$

シーイングキャンペーン期間中に得た全測定点(7月31日、8月1日、8月2日、8月13日、8月19日、8月21日、8月22日、9月2日、9月5日)のシーイングの頻度分布と累積分布の合計が図4.1である。

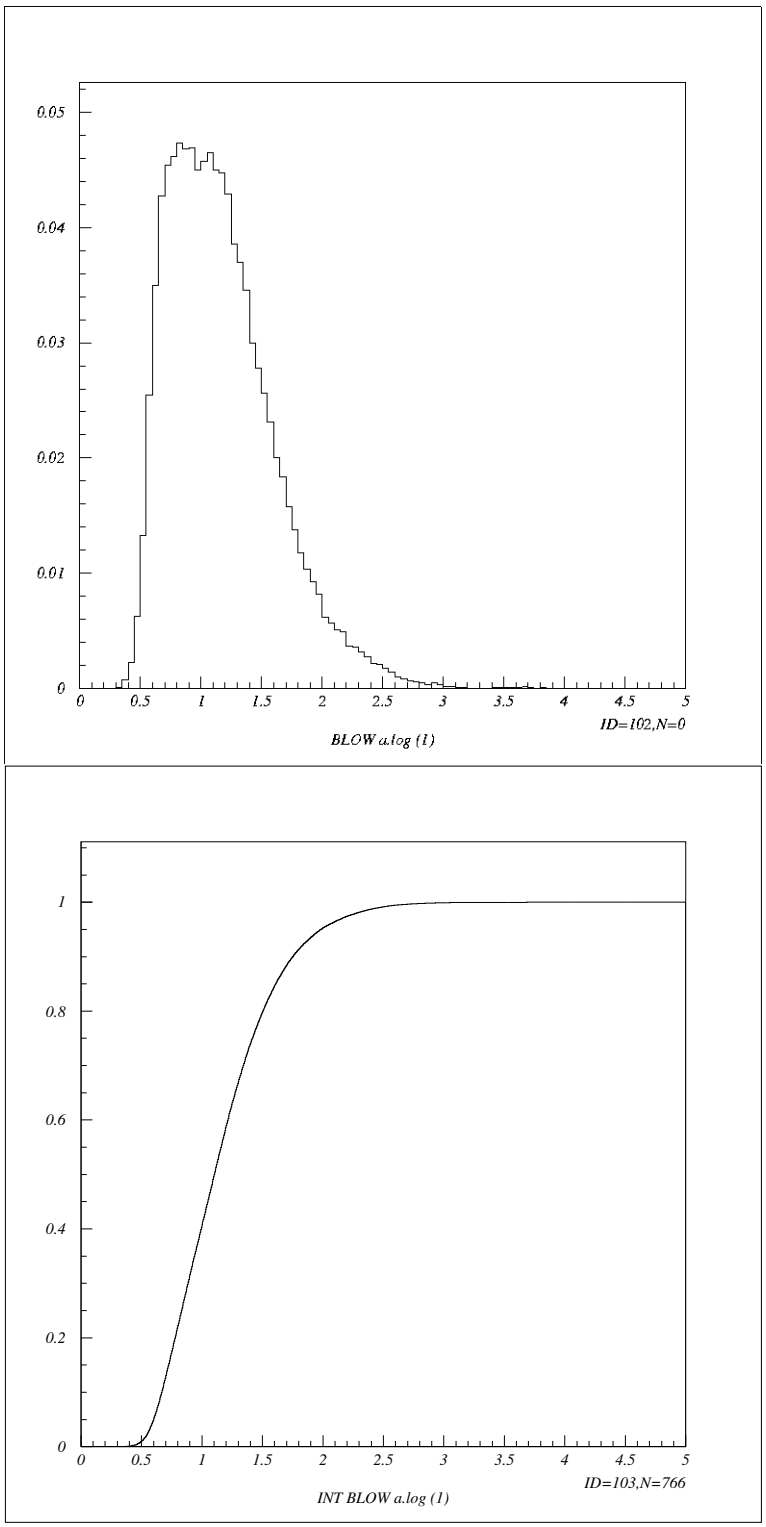

図 4.1: 2002 年 7 月 29 日から 9 月 24 日のシーイングヒストグラム (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec)、累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 シーイング arcsec)。シーイングヒストグラムからおおよそ 1 arcsec 前後に分布が集中していることが分かる。また、累積割合から測定点の 95 %までが 2 arcsec 以下のシーイングであったことが分かる。

また、日ごとのシーイング結果は表 4.2 のようになった。Subarcsec、累積割合、最頻値ともに日ごとに大きく変化することが分かる。このことは、シーイング環境を正しく評価するには複数日にわたって測定を行う必要があることを示している。

表 4.2: 2002 年夏シーイング結果

日にち	Subarcsec	中央値	最頻値
7 月 31 日	71 %	0.85 arcsec	0.75-0.8 arcsec
8 月 1 日	16 %	1.2 arcsec	1.15-1.2 arcsec
8 月 2 日	1 %	1.5 arcsec	1.3-1.35 arcsec
8 月 13 日	37 %	1.1 arcsec	0.9-0.95 arcsec
8 月 19 日	1 %	1.7 arcsec	1.65-1.7 arcsec
8 月 21 日	1 %未満	1.7 arcsec	1.6-1.65 arcsec
8 月 22 日	88 %	0.7 arcsec	0.6-0.65 arcsec
9 月 2 日	87 %	0.8 arcsec	0.8-0.85 arcsec
9 月 5 日	10 %	1.3 arcsec	1.2-1.25 arcsec
平均値	40 %	1.1 arcsec	0.8-0.85 arcsec

7 月 29 日から 9 月 24 日の間の計 9 日間のシーイングの合計から、Sub-arcsec(シーイングが 1 秒を切ったデータ点の割合) 40 %、中央値は 1.1 arcsec、最頻値は 0.8-0.85 arcsec という結果が得られた。

日本では平均的に 1.5 arcsec を切るようであれば、望遠鏡を移設する場所としては適当であると言われており、太陽クーデドーム周辺は良いシーイング環境にあると言える。(例えば世界でも良いシーイング環境として知られている国立天文台ハワイ観測所があるマウナケアでは平均的に 0.45-0.6 arcsec であり、国立天文台三鷹では平均 $3 \sim 4$ arcsec という報告がなされている。) また、2001 年には岡山観測所の 188cm 望遠鏡ドームにあるカセグレン・オートガイダからのシーイングの評価として λ =660nm で平均 1.4 arcsec という報告がなされている。これを、太陽クーデ DIMM の測定波長 λ =550nm での値へ換算すると (式 4.1)、1.17 arcsec となり、今日の太陽クーデドームにおける測定を比較してもやや悪い値である。ただし、カセグレン・オートガイダは、フォーカスのずれや、188cm 望遠鏡の振動等による影響 (望遠鏡シーイング) などもシーイングに寄与していると考えられ、188cm 望遠鏡周辺のナチュラルシーイングはこれよりも若干良い値になる筈である。このことから太陽クーデドーム周辺のシーイング環境は、188cm 望遠鏡ドーム周辺のシーイング環境と同等もしくはやや良いシーイング環境にあると考えられる。

なお、表 4.2 の測定日において、Subarcsec の割合が 30 %以上だった日は、いずれも高気圧に覆われたおだやかな気象状況下にあった。よって、今後は各サイト

において、なるべくおだやかな気象条件の下で、複数回のシーイング測定を行って評価することにした。

4.2 2003年 岡山天体物理観測所内でのシーイング調査

2002年の太陽クーデドームにおけるシーイング測定の結果、岡山天体物理観測所構内には良いシーイング環境を示す場所があることが分かった。そこで、今度は観測所内の他の場所でも測定をしてみることに した。しかし太陽クーデDIMMは望みの場所でシーイング測定ができるわけではない。そこでどこでも持ち運びが可能な京都大学DIMMを用いて、岡山天体物理観測所内のいくつかの場所でシーイング測定を行うことにした。ただし、京都大学DIMMは開発直後であり、測定精度の評価が行われていなかったので、初期にはそのキャリブレーションも必要であった。

2003年春から夏にかけて、太陽クーデドーム付近と、岡山天体物理観測所内の幾つかの場所でどこが一番良いシーイング環境にあるのか、観測所内でどのくらい変化するのかについて、シーイングに影響を与えるとされる風速、風向も考慮して調査した。岡山天体物理観測所内における調査場所は、太陽クーデドーム、DIMMドーム、CT タワー、そして現在最も有力な91cm望遠鏡ドームと188cm望遠鏡ドームの間(候補地)の4地点である。図4.2にそれぞれの地点を示す。

図 4.2: 岡山天体物理観測所内の写真

4.2.1 2003年5月1日 ~ 2日:太陽クーデDIMMと京都大学DIMMの同時測定によるキャリブレーション

京都大学 DIMM は、以前から岡山天体物理観測所にあった山田・前原シーイングモニターを改良したものである。京都大学新望遠鏡ワーキンググループが 2002 年秋から改良作業を行い、2003 年春に完成した。よってまず、京都大学 DIMM を用いて信頼できるシーイング測定ができるかどうかを確かめるために、実績のある太陽クーデ DIMM と同時にシーイング測定を行い、キャリブレーションすることにした。

5 月 1 日に太陽クーデドーム内にある太陽 DIMM と太陽クーデドームに連なる観測室屋上に京都大学 DIMM を設置して (図 4.3 参照)、同時シーイング測定をした結果、図 4.4 のようになった。

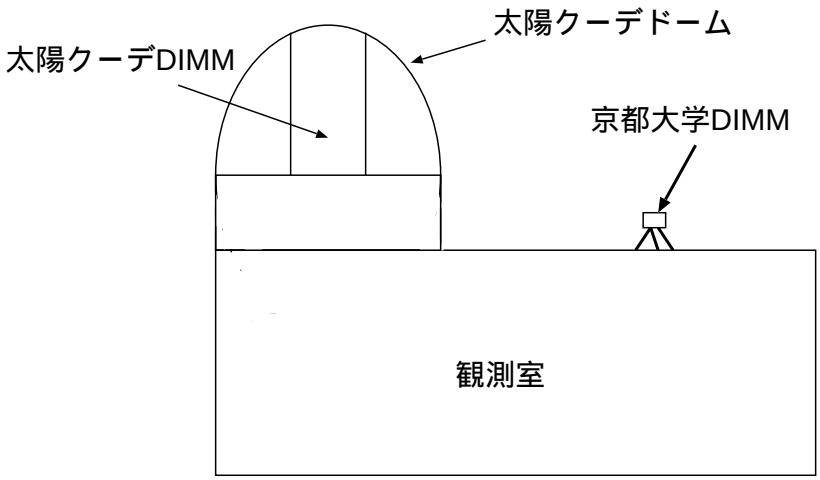

図 4.3: 太陽クーデドームの概観図

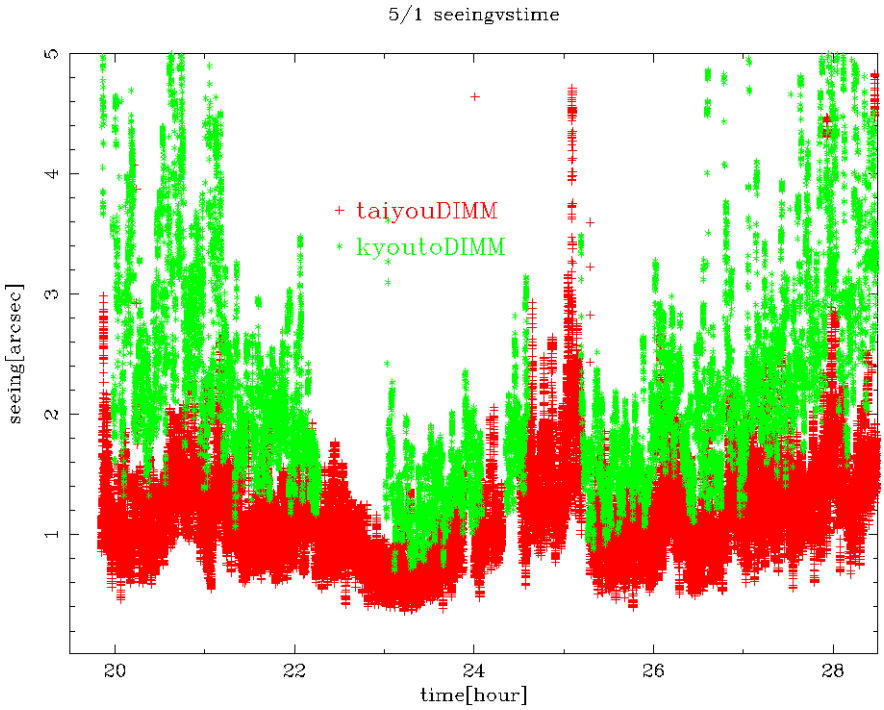

図 4.4: 2003 年 5 月 1 日 太陽クーデドームでの太陽クーデ DIMM と京都大学 DIMM のシーイング時間変動 (補正前) 縦軸 シーイング arcsec、横軸 hour。両者に統計差がみられる。

このグラフから、時間変動の傾向は非常に良く似ていることが分かり、京都大学 DIMM はシーイングの変動は検知できているようである。しかし、太陽クーデ DIMM と京都大学 DIMM のシーイングの値そのものにはには明らかに差がある。

太陽クーデ DIMM は、太陽クーデドーム内に入っているので、ナチュラルシーイングに加えてドームシーイングの影響を受け、一方、京都大学 DIMM は屋外なので、ナチュラルシーイングの影響しか受けないという違いはある。しかし、このシーイング値の差は明らかに大きすぎる。測定中の 188cm 望遠鏡のオートガイダから求められたシーイング値は太陽クーデ DIMM の値とほぼ同じであったことから、京都大学 DIMM におけるキャリブレーションパラメーターに不備があると予想された。後にこれは CCD ピクセルスケールのバグであることが判明し、正しい値は 0.6 倍になることが分かった。実際、京都大学 DIMM から求められたシーイング値に 0.6 をかけてやると、太陽クーデ DIMM とほぼ同じ値になる。(図 4.5)

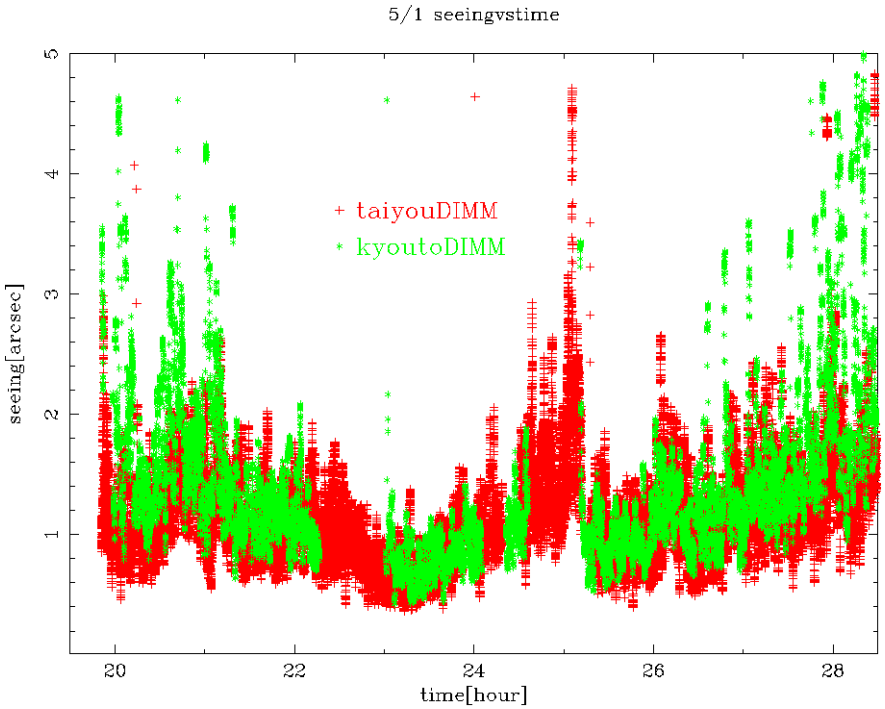

図 4.5: 2003 年 5 月 1 日 太陽クーデドームでの太陽クーデ DIMM と京都大学 DIMM のシーイング時間変動 (補正後) 縦軸 シーイング arcsec、横軸 hour。両者がほど一致する。

京都大学 DIMM の補正前と補正後のシーイングのヒストグラムと累積割合は図 4.6 のようになった。(補正前を点線、補正後を実線で表した。)

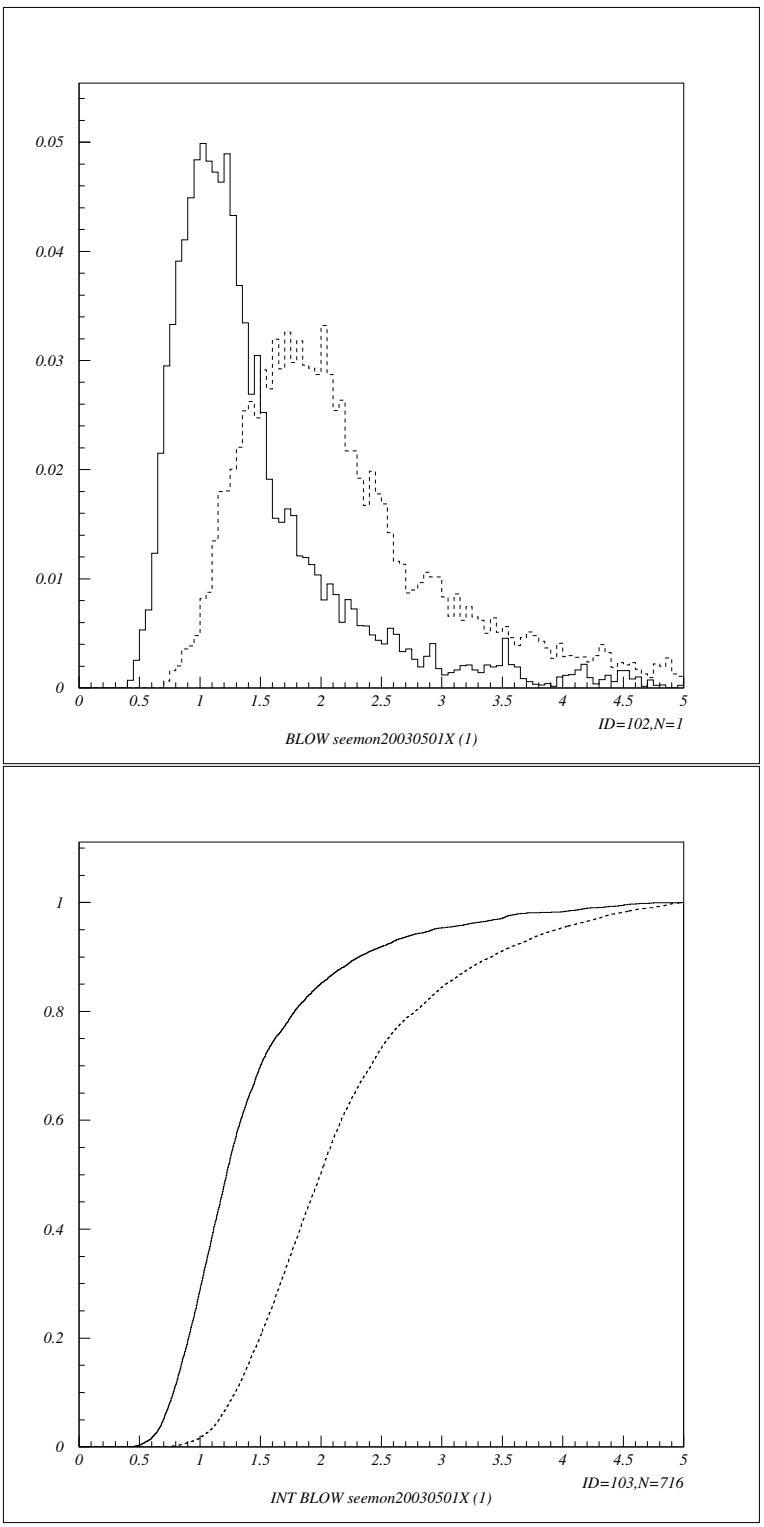

図 4.6: 2003 年 5 月 1 日 京都大学 DIMM の補正前と補正後のヒストグラム (縦軸頻度、横軸 シーイング arcsec)、累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 シーイング arcsec)

ヒストグラムから、補正後の最頻値は 1.0-1.05 arcsec となった。また、累積割合から Subarcsec の頻度は 28 %、中央値は 1.2 arcsec となった。(以後、京都大学 DIMM の測定結果はすべて補正後のものである。)

また、太陽クーデ DIMM と京都大学 DIMM の補正後のシーイングのヒストグラムと累積割合は図 4.7、図 4.8 のようになった。(太陽クーデ DIMM を実線、京都大学 DIMM を点線で表した。) 頻度分布のヒストグラムにおいて、ピーク付近の傾向は両 DIMM で良く一致しているが、京都大学 DIMM の方が大きなシーイングサイズにわたるウィングをもっていることが分かる。

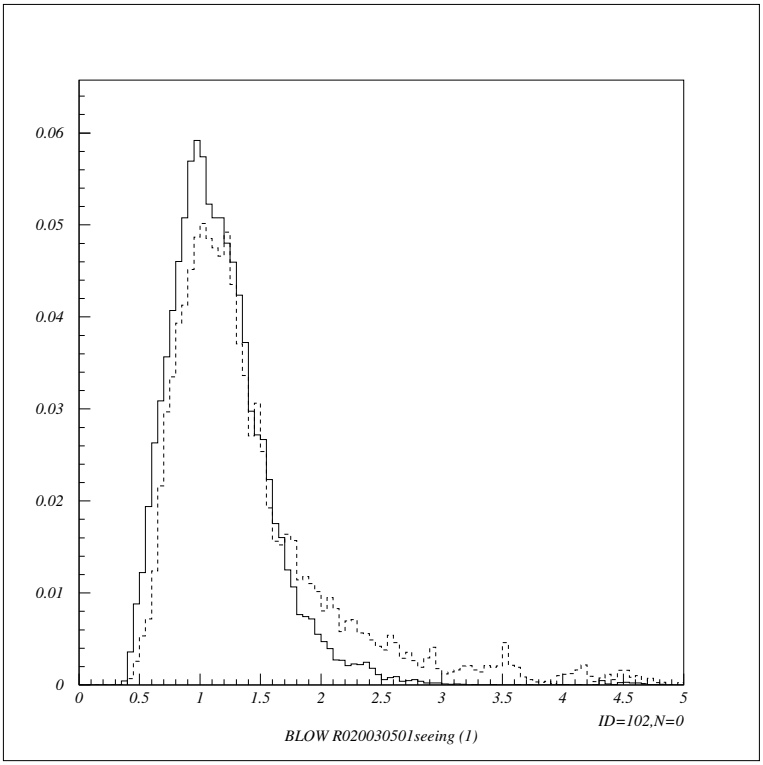

図 4.7: 2003 年 5 月 1 日 太陽クーデ DIMM(実線) と京都大学 DIMM(点線) のヒストグラム (補正後) (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec)

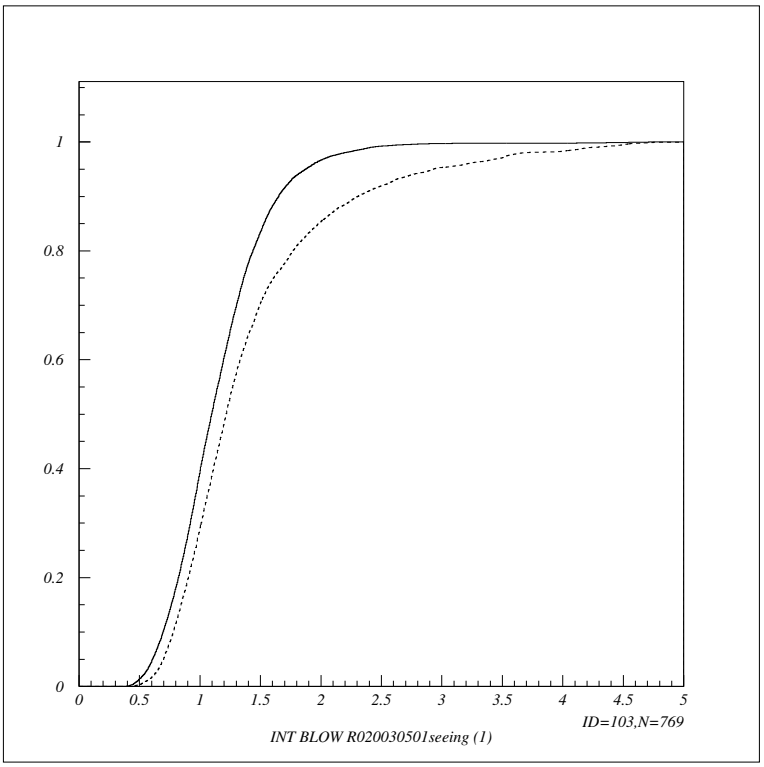

図 4.8: 2003 年 5 月 1 日 太陽クーデ DIMM(実線) と京都大学 DIMM(点線) の累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 シーイング arcsec)

この図から太陽クーデ DIMM の最頻値は 0.95-1.0 arcsec、京都大学 DIMM(補正後) の最頻値は 1.0-1.05 arcsec となった。太陽クーデ DIMM の Subarcsec の頻度は 38 %、中央値になるのは 1.1 arcsec、京都大学 DIMM の Subarcsec の頻度は 28 %、中央値になるのは 1.2 arcsec であった。

太陽クーデ DIMM のほうが京都大学 DIMM よりも良い値が得られていることについて考察してみたい。通常、ドームの中に設置されている太陽クーデ DIMM の方が、ドーム内シーイングの影響を受けるため、屋外に設置した京都大学 DIMM よりも悪い結果を与えそうであるが、その予想と異なる結果となっている。これに関しては、以下のような理由が考えられる。

1. 京都大学 DIMM はドームのすぐ脇へ設置したため、風が吹いた場合にドーム外形の影響を受けて乱流が発生した (図 4.7 のウィング成分の起源かもしれない)。

2. 太陽クーデドームはドームシーイングの影響が非常に小さい。これは太陽クーデドームの開口面積がドーム内空間体積の割に大きいことと矛盾がな

く、熱のフラッシングが有効に働いているとして解釈できる。

翌 5 月 2 日は京都大学 DIMM を岡山天体物理観測所内の赤外シミュレーター移設候補地に設置して、シーイング同時測定を行った。太陽クーデ DIMM と京都大学 DIMM のシーイングの時間変動のグラフは図 4.9 のようになった。

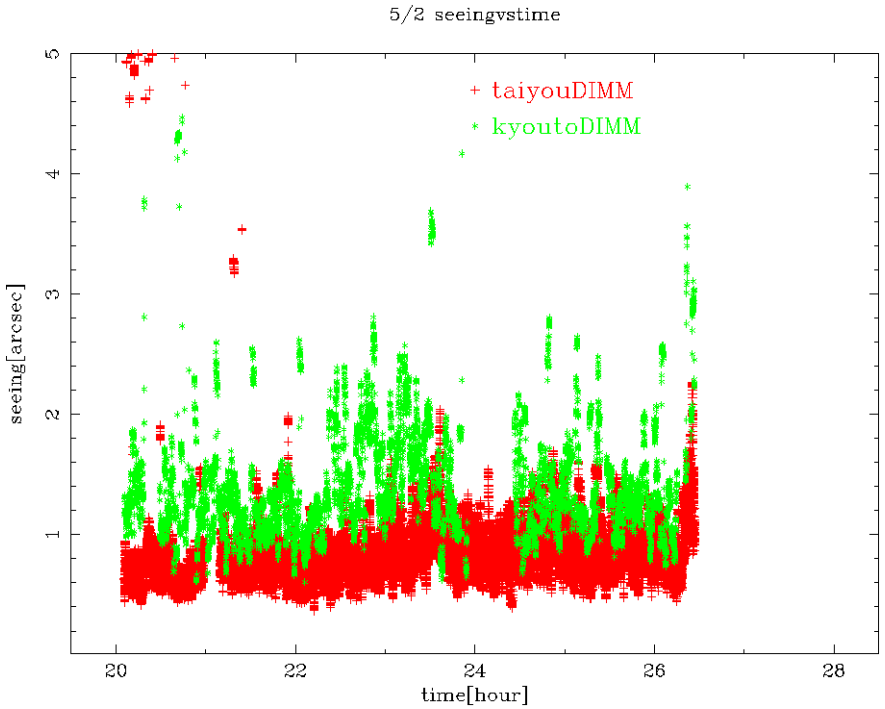

図 4.9: 2003 年 5 月 2 日 太陽クーデ DIMM と京都大学 DIMM を岡山天体物理観測所内の赤外シミュレーター移設候補地に設置したときのシーイング時間変動 (補正後) (縦軸 シーイング arcsec 横軸 hour)

このグラフを見ると、図 4.5 と異なり、時間変動の傾向に類似性があまり見られない。これは、昨日とは違い、京都大学 DIMM を太陽クーデドームからかなり離れた場所に設置したことに起因しており、同じ観測所の構内でも 100m 程も離れると、これだけシーイング環境が変わることを如実に示しているものと言えよう。

この日の太陽クーデ DIMM と京都大学 DIMM(補正後) のヒストグラムと累積割合は図 4.10 のようになった。(太陽クーデ DIMM を実線、京都大学 DIMM を点線で表した。)

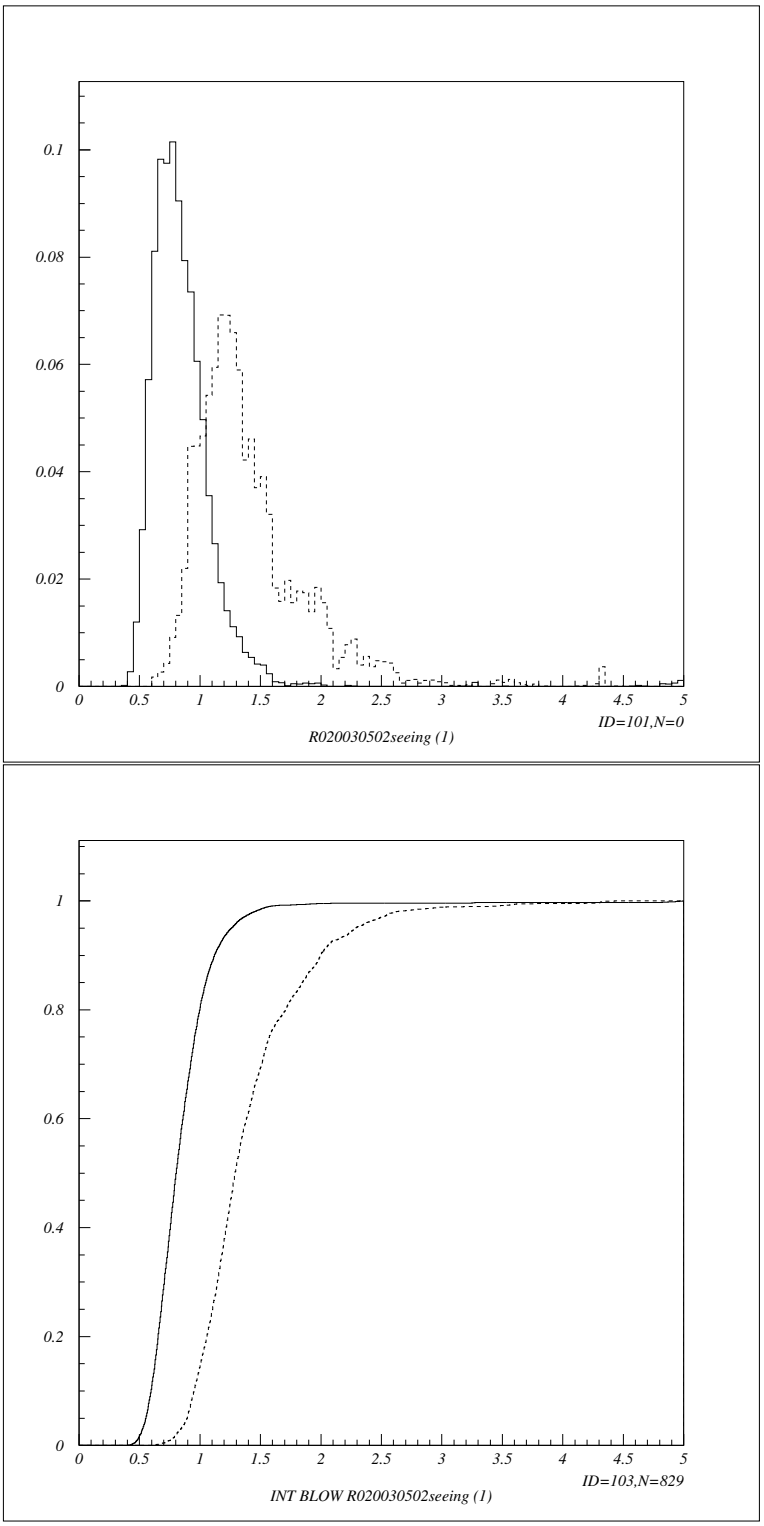

図 4.10: 2003 年 5 月 2 日 太陽クーデドームにおける測定 (太陽クーデ DIMM; 実線) と移設候補地における測定 (京都大学 DIMM; 点線) のヒストグラム (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec)、累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 シーイング arcsec)

太陽クーデ DIMM における最頻値は 0.95-1.0 arcsec、また、移設候補地に設置した京都大学 DIMM での最頻値は 1.2-1.25 arcsec であった。また、累積割合のグラフから太陽クーデ DIMM の Subarcsec の頻度は 74 %、中央値は 0.8 arcsec、京都大学 DIMM の Subarcsec の頻度は 12 %、中央値は 1.3 arcsec となった。

この結果から、少なくともこの晩については、太陽クーデドームのほうが赤外シミュレーター移設候補地よりも良いシーイング環境にあったと言える。しかし、この結果を単純にそのまま信用するのは早急すぎよう。太陽クーデ DIMM は太陽望遠鏡に同架させていることから地上からの高さが 4m 程度あり、地表付近の乱流の影響を受けにくい。一方、京都大学 DIMM は地上からの高さが 1m 程度で、かつ草むらの中で測定をしている。昨日の測定からも太陽クーデドーム内においてはやや良いシーイングが得られることが分かっており、ドームシーイングの影響は少ないとみなして良いであろう。これらを考慮すると、シーイング環境の点で太陽クーデドームにおける優位性はあるものの、移設候補地は悪条件の中でも中央値が 1.3 arcsec と、国内全般で考えると依然、良いシーイング環境にあるとみなすべきであろう。

4.2.2 2003 年 5 月 27 日 ~ 28 日 : 再キャリブレーションと京都大学 DIMM の信頼性確認

シーイングは気象条件によって大きく変わる場合があることは、2002 年の測定から分かっており、測定日を増やすことはその場所のシーイング環境を正しく評価する上で重要である。我々は約 4 週間後再び太陽クーデ DIMM と京都大学 DIMM とのシーイング同時測定を行った。この測定に先立ち、シーイングの時間変動を見やすくするためにソフトウェアの改良も行い、データ点が 1 秒間に 1 点だったのを 20 秒間程度で 1 点になるようにして測定精度を向上させた (cf.§3.2)。これにより、5 月 1、2 日のシーイングの時間変動のグラフに見られた、縦方向の異常な分布が抑えられ、シーイングの時間変動をより正しく評価することができるようになった。

また、前回 5 月 1 日のシーイング測定では、太陽クーデドームの近くに京都大学 DIMM を設置したためにシーイング測定値が悪くなったと考えられたので、今回は風の影響を受けないよう、同じ屋上でもなるべく離れた場所へ設置することにした。

5 月 27 日に京都大学 DIMM を太陽クーデドーム屋上に据えて行った同時シーイング測定のシーイングの時間変動は図 4.11 のようになった。22 時付近は太陽クーデ DIMM と京都大学 DIMM との値に開きがあるが、それ以外は時間変動、値とともに非常によく一致している。このことは京都大学 DIMM は信頼できるシーイング測定装置であることを示している。

また、頻度のヒストグラムと累積割合は図 4.12 のようになった。(太陽クーデ DIMM を実線、京都大学 DIMM を点線で表した。) ヒストグラムから太陽クーデ DIMM の最頻値は 1.1-1.15 arcsec、京都大学 DIMM の最頻値は 0.8-0.85 arcsec となった。また、累積割合から太陽 DIMM の Subarcsec の頻度は 17 %、中央値は 1.3 arcsec、京都大学 DIMM の Subarcsec の頻度は 49 %、中央値は 1.0 arcsec となった。

この晩は、全体として京都大学 DIMM の方が、太陽クーデ DIMM よりも良いシーイングを記録している。これは 5 月 1 日に行われた結果 (図 4.7、4.8) と異なり、ナチュラルシーイングのみに影響される京都大学 DIMM の方が理窟どうりに良いシーイング値を得ていることを示している。今回は京都大学 DIMM を、ドームからやや離れた場所に設置して測定しており、その効果が表われたものであるとみなしている。

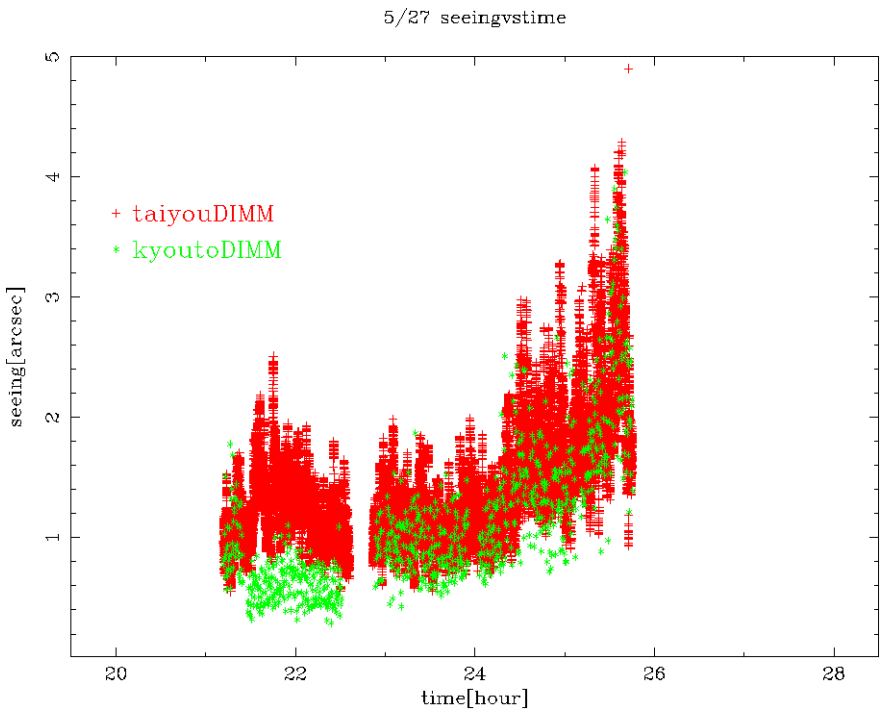

図 4.11: 2003 年 5 月 27 日 太陽クーデドームでの太陽クーデ DIMM と京都大学 DIMM のシーイング時間変動 (縦軸 シーイング arcsec、横軸 hour)

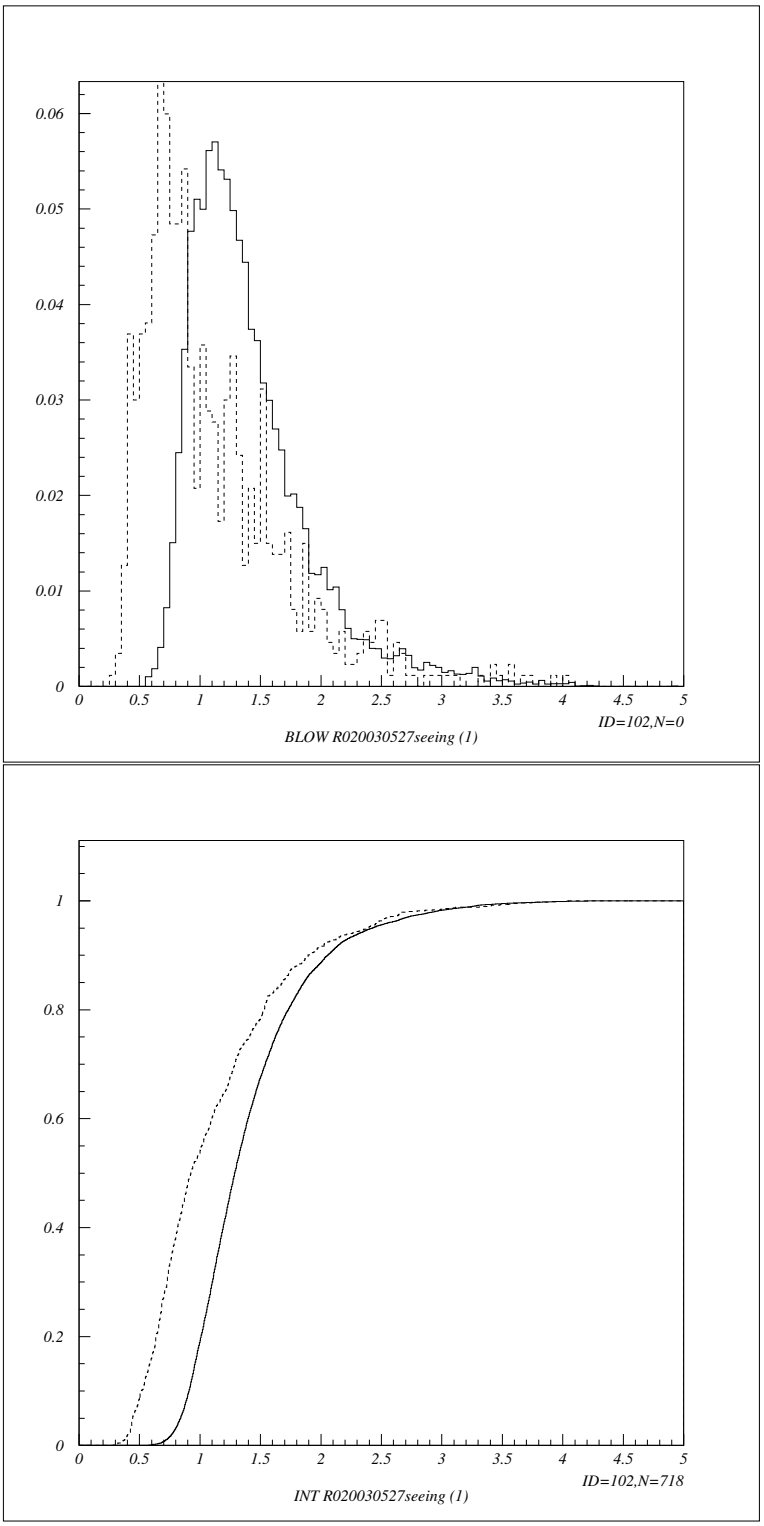

図 4.12: 2003 年 5 月 27 日 太陽クーデ DIMM(実線) と京都大学 DIMM(点線) で測定したシーイングヒストグラム (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec)、累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 シーイング arcsec)

5 月 28 日も 5 月 27 日同様、太陽クーデドームでの同時測定を行った。シーイング時間変動は図 4.13 のようになった。24 時前付近は値に開きがあるが、それ以外は非常によく一致している。また、ヒストグラムと累積割合は図 4.14 のようになった (太陽クーデ DIMM を実線、京都大学 DIMM を点線で表した)。

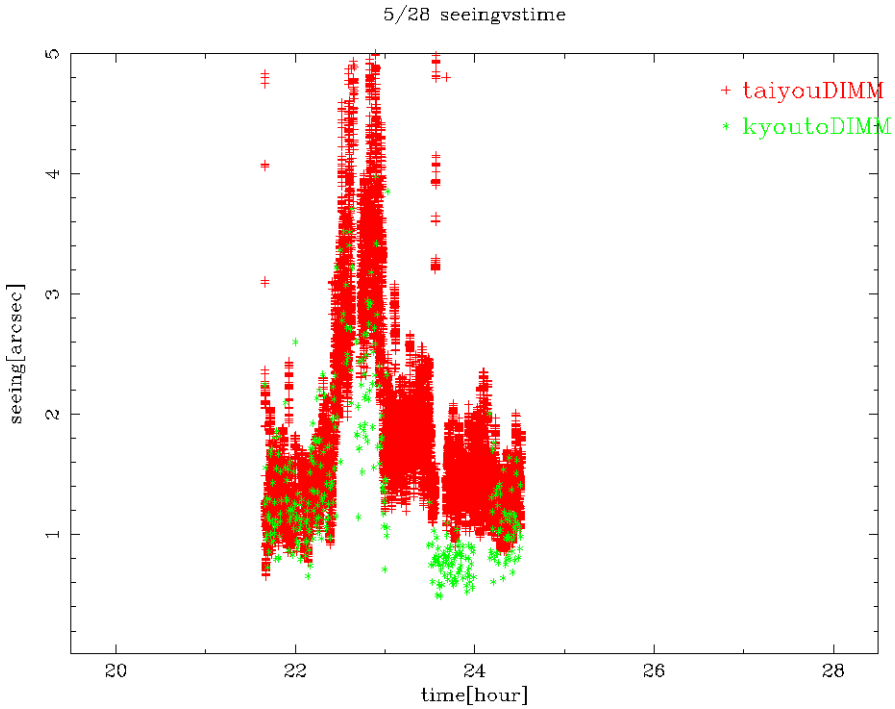

図 4.13: 2003 年 5 月 28 日 太陽クーデドームでの太陽クーデ DIMM と京都大学 DIMM のシーイング時間変動 (縦軸 シーイング arcsec、横軸 hour)

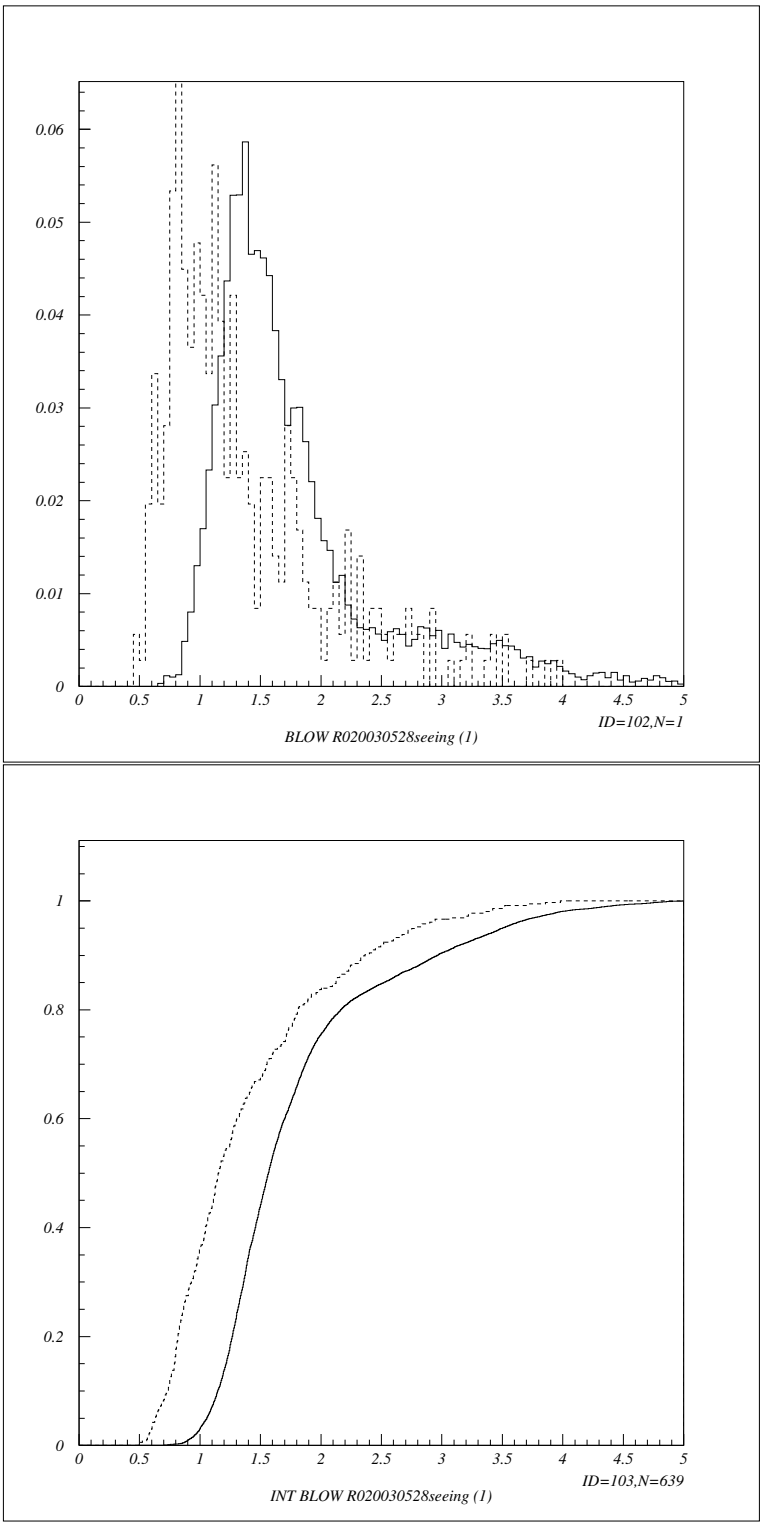

図 4.14: 2003 年 5 月 28 日 太陽クーデ DIMM(実線) と京都大学 DIMM(点線) で測定したシーイングヒストグラム (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec) と累積割合 (縦軸 累積割合、横軸シーイング arcsec)。前日とほぼ同じ傾向となった。

5 月 28 日の太陽クーデ DIMM の Subarcsec の割合は 8 %、最頻値は 1.2-1.25 arcsec、中央値は 1.45 arcsec となった。また、京都大学 DIMM の Subarcsec の割合は 36 %、最頻値は 0.8-0.85 arcsec、中央値は 1.15-1.2 arcsec となった。この日も前日と同様に太陽クーデ DIMM(ナチュラルシーイングとドームシーイング) のシーイングのほうが京都大学 DIMM(ナチュラルシーイング) よりも悪い値になった、5 月 27、28 日ともに同じ結果が得られたことは、

1. 5 月 1 日の測定の異常性がドーム建物の影響による大気の乱れを受けていたという我々の見解を支持するものであること、及び
2. 京都大学 DIMM が測定に耐えうる安定した装置であること

を示している。これ以後、京都大学 DIMM の機動性を活かして岡山観測所以外の各地での測定も開始した。(§4.2.4)

4.2.3 2003 年 5 月 ~ 8 月の岡山天体物理観測所内でのシーイング測定結果

2003 年 5 月から 8 月にかけて、京都大学 DIMM を用いて岡山天体物理観測所内のいろいろな場所でシーイング測定を行った。その頻度分布と累積分布のグラフは、付録 A に載せてある。結果を、測定日ごと、および地点ごとにまとめて、それぞれ表 4.3、表 4.4 に示す。

表 4.3: 2003 年 5 月から 8 月シーイング結果

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

表 4.3 から Subarcsec、累積割合、最頻値ともに日ごとに大きく変化することが分かった。これは 2002 年夏の測定と consistent である。しかし、全般的に見ると、最も悪い日でも中央値で 1.5 arcsec であり、観測所構内は概してどの地点も良いシーイング環境にあると言える。

つぎに、測定地点ごとにまとめた結果を表 4.4 に示す。この結果を見ると、太陽クーデドーム周辺が一番ナチュラルシーイングの環境が良いと言える。さらに、この中央値や最頻値は 2002 年夏に太陽クーデドームにて重点的に測定した結果と consistent である。しかし、太陽クーデドームでの測定はドーム屋上で行ったため、地上からの高さが 4m 程度あり、植生や地熱などの影響による乱流の影響を受けにくい。よって、太陽クーデドームでは比較的良い値が出やすいと言える。一方、DIMM ドームは地表から 3m 程度の高さがあるが、最も悪い値になっている。1 日しか測定していないので有意性は低く、天候の影響であった可能性が高い。また赤外シミュレーター移設候補地では、5 月 2 日の測定から分かるように太陽クーデドームより有意に悪い結果も得られているが、これは測定地高度の影響を少なからず含んでいる筈である。その結果で中央値 1.3 arcsec が得られ、太陽クーデドームと 0.1 arcsec の差しかなかったことは、この候補地も良い環境にあったと結論付けられることを示している。CT タワーは、測定地のローカルな条件は移設候補地と良く似ているが、測定結果もほとんど consistent であった。以上のことから岡山観測所構内はどの地点でも平均的に良いシーイング環境を示しており、地点ごとの差は少ないと結論付けられる。

表 4.4: 2003 年 5 月から 8 月の場所ごとのシーイング平均値

場所	測定日	Subarcsec の割合	中央値	最頻値
太陽クーデドーム	5 月 1、27、28 日	29 %	1.2 arcsec	1.0-1.05 arcsec
移設候補地	5 月 2 日、8 月 2 日	12 %	1.3 arcsec	1.2-1.25 arcsec
DIMM ドーム	5 月 29 日	3.0 %	1.5 arcsec	1.15-1.35 arcsec
CT タワー	7 月 31 日、8 月 1 日	25 %	1.25 arcsec	1.1-1.15 arcsec

4.3 2003 年 8 月 ~ 12 月広島県でのシーイング測定の結果

2003 年 5 月から 8 月にかけては、京都大学 DIMM を用いて岡山天体物理観測所内のいろいろな場所でシーイング測定を行った。その結果、岡山天体物理観測所内は平均的に良いシーイング環境にあることが分かった。一方、赤外シミュレーターの移設候補地としては、利便性の点で有利な広島県内のサイトも数カ所挙げ

られていた。そこで、2003 年 8 月から 12 月にかけて、京都大学 DIMM を持ち出し、広島県内で (主に東広島周辺) シーイング測定を行った。各測定地点での頻度分布と累積分布は付録 B に載せているので、必要に応じて参照されたい。

図 4.15: 広島県内でのシーイング測定地点

日ごとのシーイング結果は表 4.5 のようになった。

表 4.5: 2003 年広島県の測定日ごとのシーイング結果

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

場所ごとでの Subarcsec、中央値、最頻値をまとめると表 4.6 のようになった。

表 4.6: 2002 年夏シーイング結果

場所	測定日	Subarcsec の割合	中央値	最頻値
広島大学教育学部	8 月 6 日	2 %	2.05 arcsec	1.6-1.65 arcsec
広島大学理学部	9 月 16 日、17 日	1.7 %	2.3 arcsec	1.5-1.55 arcsec
板鍋山 (豊栄町)	9 月 26 日、10 月 8 日	0.8 %	2.2 arcsec	1.5-1.55 arcsec
福成寺 (東広島市)	12 月 1、3、8、10、14、16、17、24 日	20.1 %	1.4 arcsec	1.1-1.15 arcsec
保野山 (安芸津町)	12 月 2、4 日	2.6 %	1.75 arcsec	1.45-1.5 arcsec

広島大学構内

広島大学理学部でのシーイングの Subarcsec の割合、中央値、最頻値はそれぞれ 1.7 %、2.3 arcsec、1.5-1.55 arcsec という結果が得られた。また、教育学部でのシーイングの Subarcsec の割合、中央値、最頻値はそれぞれ 2 %、2.05 arcsec、1.6-1.65 arcsec という結果が得られた。これは、岡山観測所での値に比べるとかなり悪いと言える。広島大学構内では光害がひどいことや、西条雲と呼ばれる 22 時付近まで雲が発生する地形独特の現象もあり、望遠鏡を設置する場所としては相応しい場所とは言えないであろう。

板鍋山

板鍋山でのシーイングの Subarcsec の割合、中央値、最頻値はそれぞれ 0.8 %、2.2 arcsec、1.5-1.55 arcsec という結果が得られた。岡山観測所と比べると有意に悪い。測定を行った 2 晩ともに快晴であったのにもかかわらず、山頂付近では風が強かった。風は一般に乱流を誘発し、シーイングの低下を招く。

福成寺

福成寺でのシーイングの Subarcsec の割合、中央値、最頻値はそれぞれ 20.1 %、1.4 arcsec、1.1-1.15 arcsec という結果が得られた。福成寺では理想的な天候条件であった 12 月 3 日、12 月 10 日、12 月 14 日、12 月 16 日には Subarcsec の割合がそれぞれ、26 %、14 %、31 %、50 %という良い結果が得られた。また、それ以外の日には 5 %未満であった。このことから日々の気象条件によって大きくシーイング環境が変動するが、中央値が平均 1.4 arcsec であることを考慮すると、岡山

観測所と同程度に良いシーイング環境にあると言える。

保野山

保野山でのシーイングの Subarcsec の割合、中央値、最頻値はそれぞれ 2.6 %、1.75 arcsec、1.45-1.5 arcsec という結果が得られた。2 晩の測定のうち、12 月 2 日は風が弱かったせいか中央値が 1.65 arcsec、12 月 4 日は風が強かったせいか中央値が 2.1 arcsec となった。

この結果から福成寺周辺が飛び抜けてナチュラルシーイングの環境が良いことが分かった。今回の測定条件は地上からの高さがどこも 1 m 程度で同じであり、得られた結果は有意であろうと考えられる。この福成寺の結果は、岡山天体物理観測所内のシーイング環境に匹敵する。福成寺以外の場所が、岡山天体物理観測所や福成寺周辺と比べてシーイング環境が悪いことはほぼ明らかである。

4.4 福成寺・岡山天体物理観測所における同時シーイング測定

2002 年から 2003 年にかけての岡山・広島におけるシーイング測定の結果、岡山天体物理観測所と東広島市の福成寺周辺が良いシーイング環境にあることが分かった。そこで、岡山・広島県とも天候の良い日を選んで岡山天体物理観測所では太陽クーデ DIMM を用い、福成寺周辺では京都大学 DIMM を用いて同時シーイング測定を行った。測定は 12 月 16 日、24 日の 2 晩行った。12 月 16 日に行った同時シーイング測定の時間変動、ヒストグラム、累積割合の結果はそれぞれ図 4.16、図 4.17 のようになった。また、24 日の結果はそれぞれ図 4.18、図 4.19 のようになった。(太陽クーデ DIMM を実線、京都大学 DIMM を点線で表した。)

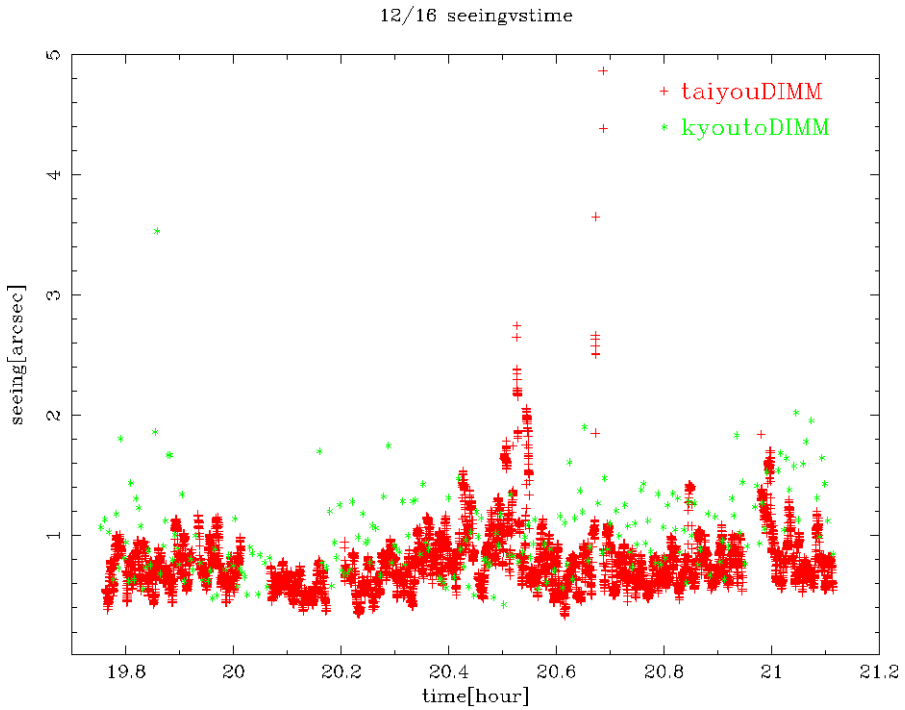

図 4.16: 12 月 16 日 同時シーイング測定のシーイング時間変動 (縦軸 シーイング arcsec、横軸 hour)

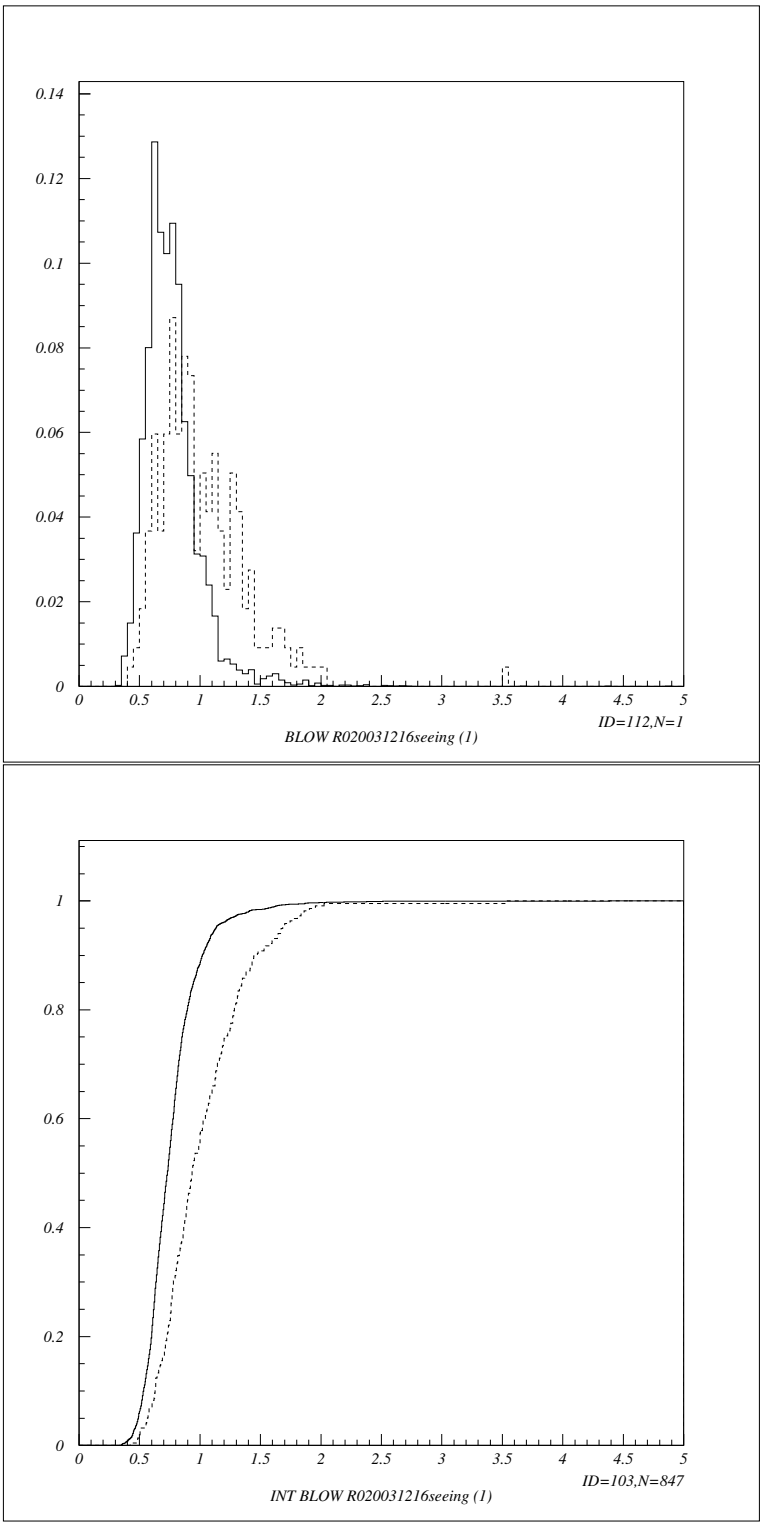

図 4.17: 12 月 16 日 岡山観測所 (太陽クーデ DIMM; 実線) と福成寺 (京都大学 DIMM; 点線) から得られたシーイングヒストグラム (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec)、累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 シーイング arcsec)

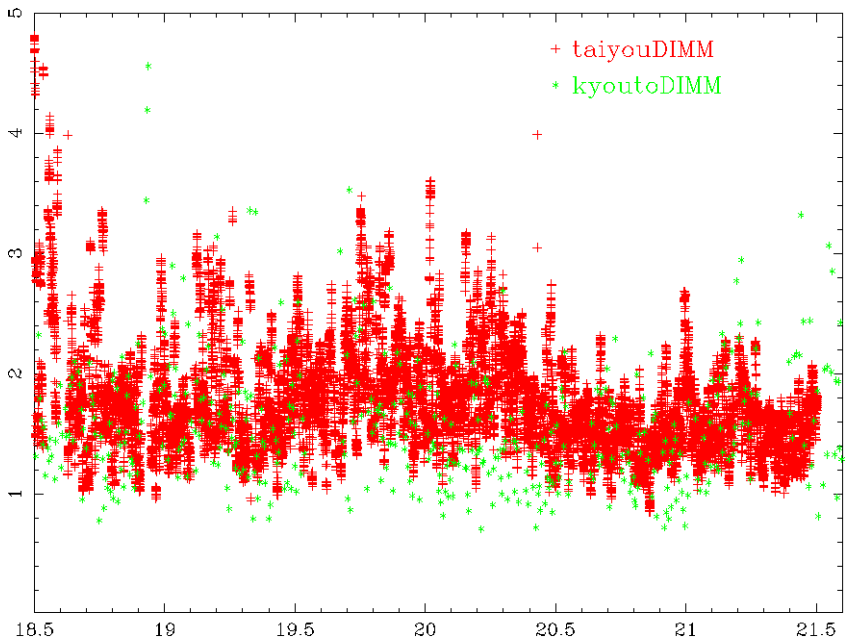

図 4.18: 12 月 24 日 同時シーイング測定のシーイング時間変動 (縦軸 arcsec、横軸 hour)

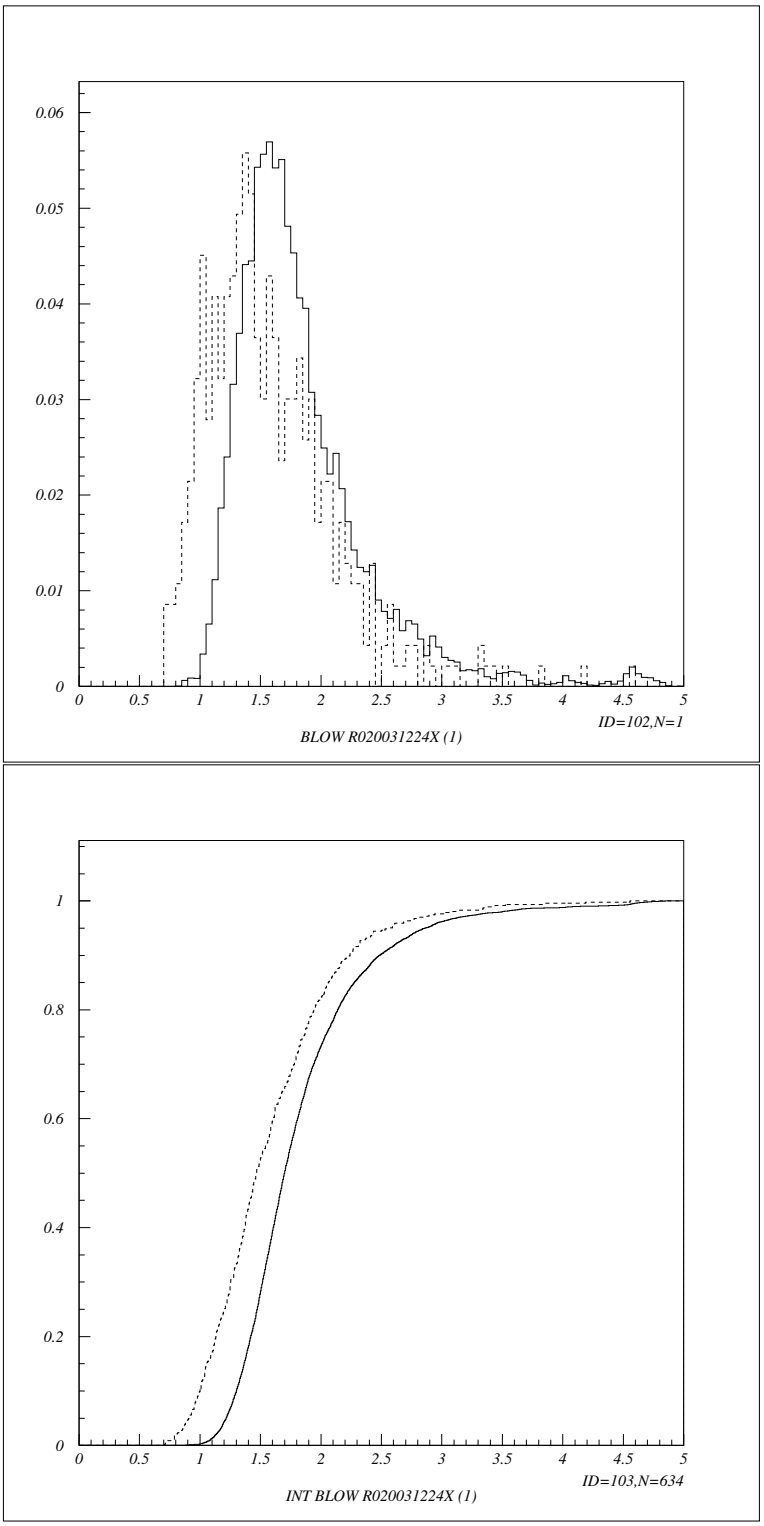

図 4.19: 12 月 24 日 岡山観測所 (太陽クーデ DIMM; 実線) と福成寺 (京都大学 DIMM; 点線) から得られたシーイングヒストグラム (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec)

表 4.7: 岡山、福成寺 同時シーイング測定の結果

日時	Subarcsec の割合	中央値	最頻値
12 月 16 日 (岡山観測所)	87 %	0.75 arcsec	0.6-0.65 arcsec
12 月 16 日 (福成寺)	50 %	1.0 arcsec	0.75-0.8 arcsec
12 月 24 日 (岡山観測所)	1 %未満	1.7 arcsec	1.6-1.65 arcsec
12 月 24 日 (福成寺)	10 %	1.45 arcsec	1.4-1.45 arcsec

Subarcsec の割合と中央値、最頻値を表にまとめたものが表 4.7 である。これを見ると、12 月 16 日は、両地ともに中央値が 1 arcsec 以下という絶好のコンディションであったことが分かる。一方、12 月 24 日は平均的かやや悪い気象状況だったと言えよう。双方は地理的に近く (100km 程度)、大雑把には似たような気象の影響を受けているものと思われる。岡山と福成寺で比較すると、12 月 16 日は岡山の方が有意に良い結果が出ており (中央値で 2 ~ 3 割小さい)、一方 24 日は福成寺の方が良い結果が得られた (中央値で 1 ~ 2 割小さい)。つまり、両方の日で逆転した結果となっている。シーイングは、ローカルな地形や風向きでも大きく変化する場合があり、そういった効果がこのような結果を生んだのであろう。この 2 日間の測定では、両者に明確には優劣をつけられず、同程度に良さそうであるという判断にとどまる。より明確にするには、測定日を格段に増やす必要があるが、それは本論文の主旨を超えるため、測定はこの 2 日にとどめる。それでも今回の結果から、2 点ほど注目しておきたい。

1. 両測定地ともシーイングが良かった 16 日は、岡山の方がより良く、両者ともシーイングがあまり良くなかった 24 日は、福成寺の方が良い結果が得られた。

2. いずれの日も、頻度分布において岡山の方がより狭い範囲に落ち着いている。つまり、岡山の方が時間的に安定したシーイング環境を示していた。

特に 2. は岡山の優位性を物語っている可能性もある。

4.4.1 岡山における風速、風向とシーイングの関連について

シーイングと大気中の風は理論上深く関係している。つまり、風は大気中の乱流を誘発しやすく、温度 (屈折率) の非一様性を促進するためである (cf.§2.2)。岡山天体物理観測所には気象モニターが設置されており、その風向、風速のデータを得ることができる。そこで、シーイングの時間変動との間に関係があるのかどうかを調べてみた。2002 年 8 月 19 日から 2003 年 8 月 2 日の間に岡山天体物理観測所

で行ったシーイング測定を同じ時刻の風向、風速の変化は付録 C に日ごとに示してある。日ごとのグラフを俯瞰しただけでは相関の存在は特に認められない。また、観測日ごとのシーイングと風速の平均値を表にしたのが表 4.8 であるが、2002 年 9 月 5 日のように風速が小さくてもシーイングが良くない日もあり、相関は明確ではない。図 4.20 に相関図をプロットしたが、ほとんど相関はみられない。日ごとの平均では、シーイングと風速には明確な相関は認められない。 一方、シーイングや風速に比較的顕著な時間変動がみられた 2003 年 5 月 1 日の時系列データを図 4.21 にプロットしてみた。この図をみると、やや緩やかな右上りの相関があるようにも思えるが、相関係数は 0.17 と小さく、統計的に有意な相関があるとは言えない。以上のことは、岡山観測所におけるシーイング環境がローカルな風に敏感という訳ではないことを指しており、理想的な立地条件下であることを示している。

表 4.8: 気象条件

日時	日平均風速 m/s	シーイング arcsec
2002 年 8 月 19 日	2.3	1.7
2002 年 8 月 21 日	2.6	1.7
2002 年 8 月 22 日	2.3	0.7
2002 年 9 月 2 日	2.1	0.8
2002 年 9 月 5 日	2.5	1.3
2003 年 5 月 1 日	2.4	1.2
2003 年 5 月 2 日	1.3	1.3
2003 年 5 月 27 日	4.4	1.0
2003 年 5 月 28 日	3.6	1.2
2003 年 5 月 29 日	4.2	1.5
2003 年 7 月 31 日	3.5	1.4
2003 年 8 月 1 日	2.2	1.2
2003 年 8 月 2 日	2.3	1.3

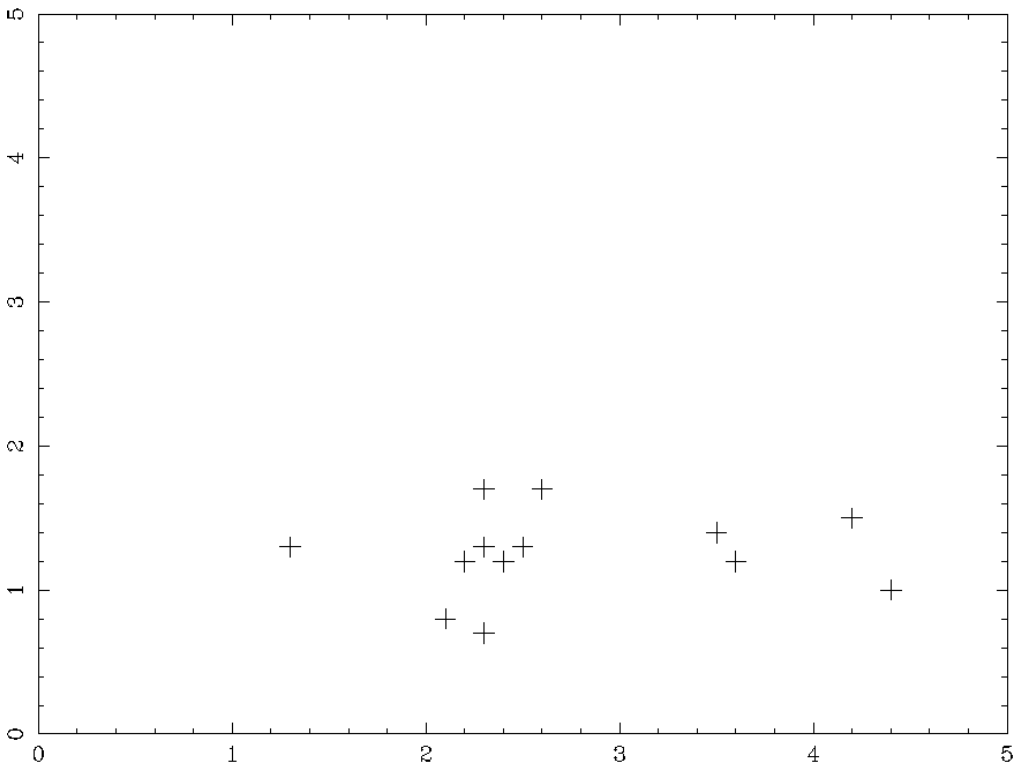

図 4.20: 日ごと (計 13 晩の) シーイングの中央値と平均風速の相関図 (縦軸 シーイング arcsec、横軸 風速 m/s)。相関は認められない。

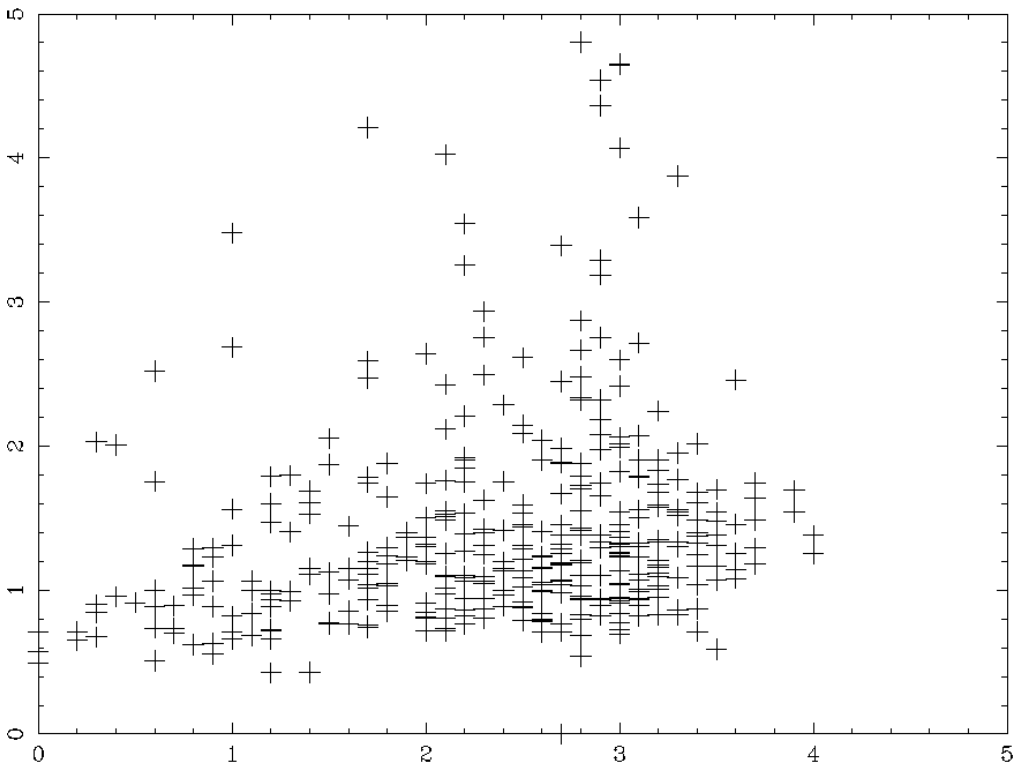

図 4.21: シーイングと風速の相関図 (縦軸 シーイング arcsec、横軸 風速 m/s)。右上りの緩やかな相関があるようにも見えるが、相関係数は 0.17 と小さく、統計的に有意とは言えない。

4.5　前半夜から後半夜にかけてのシーイングの変動

前半夜と後半夜では、前半夜のほうが地表からの熱放射の影響を受けてシーイング環境が悪くなる可能性があると考えられる。例えば、シーイング統計が精力的に記録されているすばる望遠鏡では、観測開始直後のシーイングの悪さが指摘されている。(Miyashita et al. 2001 年度 すばるユーザーズミーティング集録, p14) そこで、天候が安定しており、長時間シーイング測定をすることができた 5 月 1、2、27、28 日、7 月 31 日、8 月 1、2 日の計 7 晩のデータを、24 時を境に前半夜、後半夜に分けてシーイングの累積割合を調べてみた。

図 4.22 に前半夜、後半夜それぞれのシーイングの累積割合を示す。

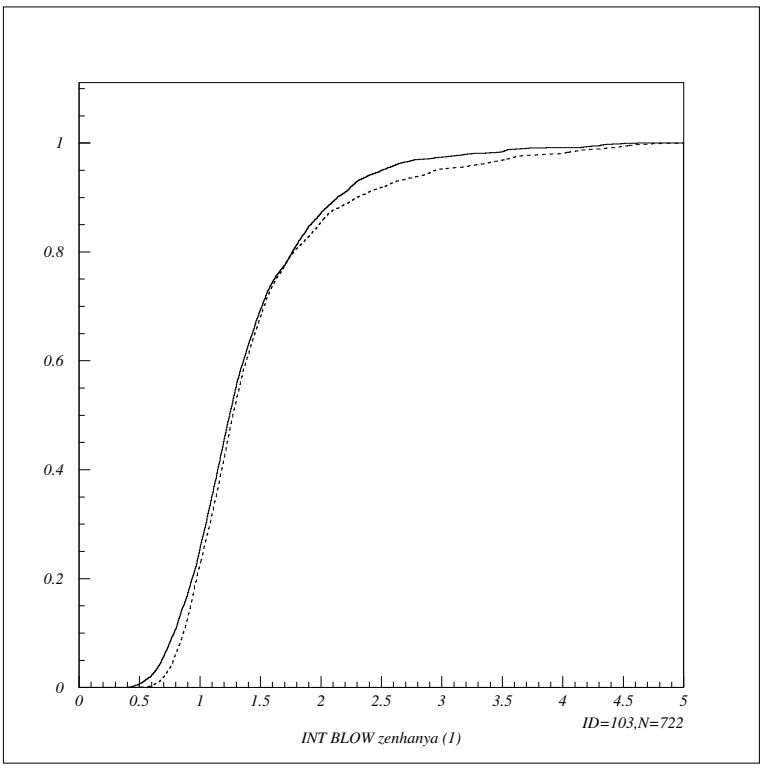

図 4.22: 5 月 1、2、27、28、7 月 31、8 月 1、2 日の岡山観測所内のシーイングの前半夜 (実線) と後半夜 (点線) の累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 シーイング arcsec) の合計の比較。前半夜と後半夜では違いは認められない。

前半夜の Subarcsec の割合は 25 %、中央値は 1.25 arcsec であった。また、後半夜の Subarcsec の割合は 21 %、中央値は 1.3 arcsec であった。

この結果から前半夜でも後半夜でも観測条件はほとんど変わらないと言える。すばる望遠鏡のような傾向が見られなかったことについては、京都大学 DIMM は屋外で測定しているので、ドーム内の温度不均一等のドームシーイングの影響を受けないからであるということが考えられる。また、地表からの熱放射の影響は小

さいと言える。

4.6 岡山、広島県の気象条件

これまでのシーイング測定の結果から、岡山天体物理観測所と、東広島市にある福成寺の二ヶ所が良いシーイング環境にあることが分かった。ここでは気象庁のデータベースから広島県の安芸津町に近い竹原市、瀬戸内海沿いの福山市、東広島市、豊栄町に比較的近い世羅町、岡山県の岡山天体物理観測所がある鴨方町の両隣りの笠岡市、倉敷市の 6 地点の年日照時間、年平均風速のデータを参照する。1996 年ー 2001 年の 6 年間の結果をグラフにプロットすると、図 4.23、図 4.24 のようになる。

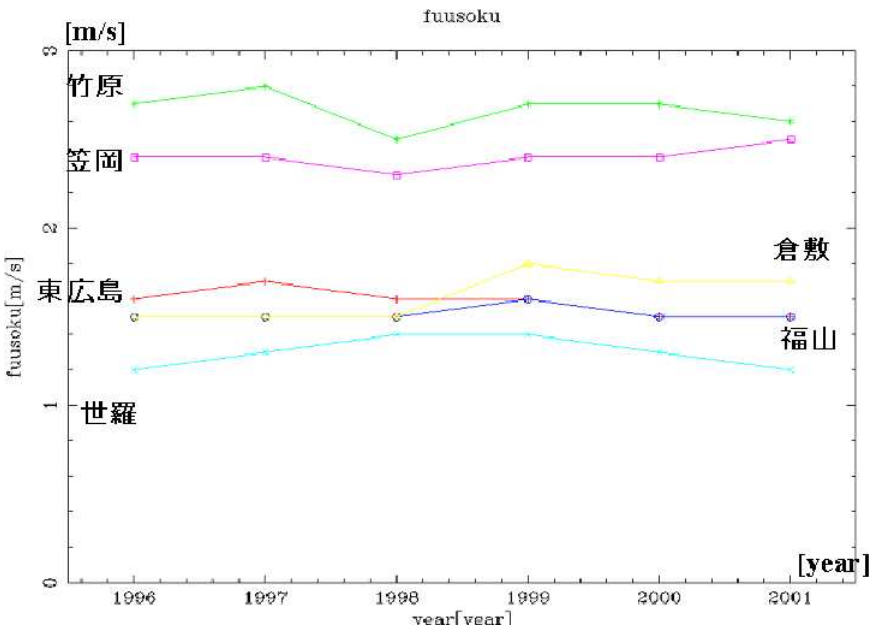

図 4.23: 岡山県と広島県の年平均風速のグラフ (縦軸 風速 ms、横軸 year)

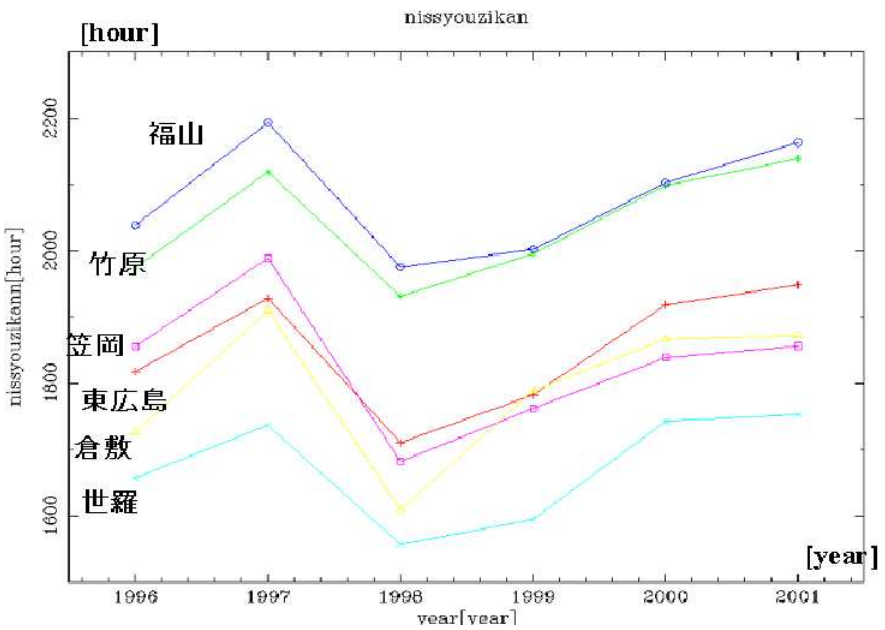

図 4.24: 岡山県と広島県の日照時間のグラフ (縦軸 日照時間 hour、横軸 year)

日照時間は昼間のデータであり、夜間の晴天率として参照する場合は注意が必要であろうが、大局的な気象条件による晴天率を見る場合には、両者に相関があるとして良いであろう。また、風速については今回の岡山天体物理観測所の結果からはあまりナチュラルシーイングには影響を与えないようであるが、風が強いことにより望遠鏡が振動する可能性もあるので、弱いほうが良い。

風速においては世羅町、福山市、東広島市、倉敷市が良く、日照時間においては福山、竹原が飛び抜けて良いことが分かった。瀬戸内海沿いでは風は強いが日照時間は長く、内陸のほうは風は弱いが日照時間が短い。つまり、風の強さでは保野山の条件が他の場所に比べて悪いと考えられる。一方、晴天率でみると、保野山が最も好条件にあり、板鍋山が最も悪いとみなすことができる。岡山と東広島 (福成寺) は保野山には多少劣るものの、同程度に良いと考えられる。

第5章　まとめと考察

5.1　シーイング測定のまとめ

我々は、赤外シミュレーター 1.5 m 望遠鏡の移設適地を判定するため、岡山天体物理観測所及び広島県内の数カ所でシーイング測定を行った。シーイングは観測効率に重要な影響を与える。本章では、測定結果と判定内容を短くまとめると共に、候補地において得られた平均シーイング値を用いて、現実の状況の理解をより深めてみた。2002 年、2003 年に行った各地でのシーイング測定の結果をまとめると表 5.1 のようになる。

表 5.1: 2002、2003 年シーイング結果

場所	Subarcsec の割合	中央値	最頻値
2002 年太陽クーデドーム	40 %	1.1 arcsec	0.8-0.85 arcsec
2003 年太陽クーデドーム	29 %	1.2 arcsec	1.0-1.05 arcsec
候補地	13 %	1.3 arcsec	1.2-1.25 arcsec
DIMM ドーム	3.1 %	1.5 arcsec	1.15-1.35 arcsec
CT タワー	25 %	1.25 arcsec	1.1-1.15 arcsec
広島大学教育学部	0.9 %	2.05 arcsec	1.6-1.65 arcsec
広島大学理学部	1.7 %	2.3 arcsec	1.5-1.55 arcsec
板鍋山 (豊栄町)	0.8 %	2.2 arcsec	1.5-1.55 arcsec
福成寺 (東広島市)	20 %	1.4 arcsec	1.1-1.15 arcsec
保野山 (安芸津町)	2.6 %	1.75 arcsec	1.45-1.5 arcsec

この結果から、最も良いシーイング環境にあるのは岡山観測所で、その中でも太陽クーデドーム周辺であることが分かる。そして CT タワー、福成寺、岡山天体物理観測所内の移設候補地 (草むらの中で測定していることを考慮) が次点として考えられる。また、岡山天体物理観測所内は、中央値がいづれも 1.5 arcsec 以内となっており、場所ごとの細かい要因の違いによらず、どこでもシーイング環境にあると言える。岡山では近年、シーイング環境の向上のため、周辺の樹木を伐採するなどの努力をしているということであり、その効果があらわれているのではないかとも考えられる。

また、各地の気象条件の違いは表 5.2 のようになった。

表 5.2: 気象条件

場所	年平均日照時間 hour	年平均風速 m/s
2002 年太陽クーデドーム 2003 年太陽クーデドーム 候補地 DIMM ドーム CT タワー	1830.3(笠岡) 1795.1(倉敷)	2.4(笠岡) 1.6(倉敷)
広島大学教育学部	1850.6(東広島)	1.6(東広島)
広島大学理学部	1850.6(東広島)	1.6(東広島)
板鍋山 (豊栄町)	1673.2(世羅)	1.3(世羅)
福成寺 (東広島市)	1850.6(東広島)	1.6(東広島)
保野山 (安芸津町)	2042.6(竹原)	2.7(竹原)

表 5.2 より、年平均日照時間が最も長いのは安芸津町 (竹原市の隣り) にある保野山、最も短いのは豊栄町 (世羅町の隣り) にある板鍋山であった。また、年平均風速が最も強いのが安芸津町 (竹原市の隣り) にある保野山、最も弱いのが豊栄町 (世羅町の隣り) にある板鍋山であった。全体的な傾向として、日照時間は瀬戸内海側が長く、北にいくにつれて短くなる。風速は瀬戸内海側が強く、北にいくにつれて弱くなっている。

シーイング、気象条件といった科学的条件を基に総合的に判断した結果、赤外シミュレーターの移設最適地は、岡山天体物理観測所内か東広島市の福成寺周辺の二つに明快に絞られるという結論に至った。今後、人文社会的な条件や国立天文台、自治体等との連携も考慮して判定することになる。

なお、前半夜、後半夜によってシーイング環境が異なるのかどうかを調べたが、岡山天体物理観測所内では前半夜、後半夜ではシーイング環境はほとんど変わらないということが分かった。また、岡山観測所内のローカルな風、風向とシーイング環境との相関を調べてみたが、全くと言って良いほど相関は見られなかった。シーイングは地上高 $1 \sim 2$ m でのローカルな風速、風向で大きく左右されるような量ではないと考えられる。

今後の課題としては、岡山天体物理観測所で行われているように、赤外シミュレーター移設後、その付近で定量的にシーイング測定を行うことによってより良いシーイング環境を整備することが挙げられる。それによって、赤外シミュレーターを用いた、より高度なサイエンスが可能となる。

5.2 岡山や福成寺における現実の光波面揺らぎの定量化

以上のように求められたシーイングの値から、Fried's parameter を介し、波面や位相の揺らぎが一体どの程度であるのかを調べてみる。式 (3.1)、式 (3.5)、式 (3.8) を使って、位相構造関数 $D_\phi(r)$ と位相揺らぎ $\rangle\Delta\phi(r)\langle$ 及び、波面揺らぎ $\rangle\Delta Z(r)\langle$ の間で以下のような式変形を行った。

$$D_\phi(r) = 6.88\left(\frac{r}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \tag{5.1}$$

$$D_\phi(r) = \langle|\phi(x+r) - \phi(x)|^2\rangle \tag{5.2}$$

$$\langle\Delta\phi(r)\rangle = \langle|\phi(x+r) - \phi(x)|\rangle \tag{5.3}$$

$$\langle\Delta\phi(r)\rangle = \sqrt{6.88\left(\frac{r}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}}} \tag{5.4}$$

$$\langle\Delta Z(r)\rangle = \frac{\lambda}{2\pi}\langle\Delta\phi(r)\rangle = 0.417\lambda\left(\frac{r}{r_0}\right)^{\frac{5}{6}} \tag{5.5}$$

つまり、r だけ離れた任意の 2 点間での波面誤差 (1σ) が 5.5 式で表されることになる。

シーイングに岡山や福成寺で得られた典型値 1.3 arcsec を与えると、Fried's parameter は 8.56 cm となる。この場合の天体光の波面誤差は図 5.1 のようになる。つまり、口径 1.5 m 望遠鏡の両端においては、到達する光波面は 0.8λ ほどの誤差を典型的にもっていることになる。田中ら (国立天文台報,2,537,1995) によると、赤外シミュレーターカセグレン焦点での波面収差は RMS 値で 0.049λ となっており、大気による波面揺らぎの方が支配的になっていることが分かる。

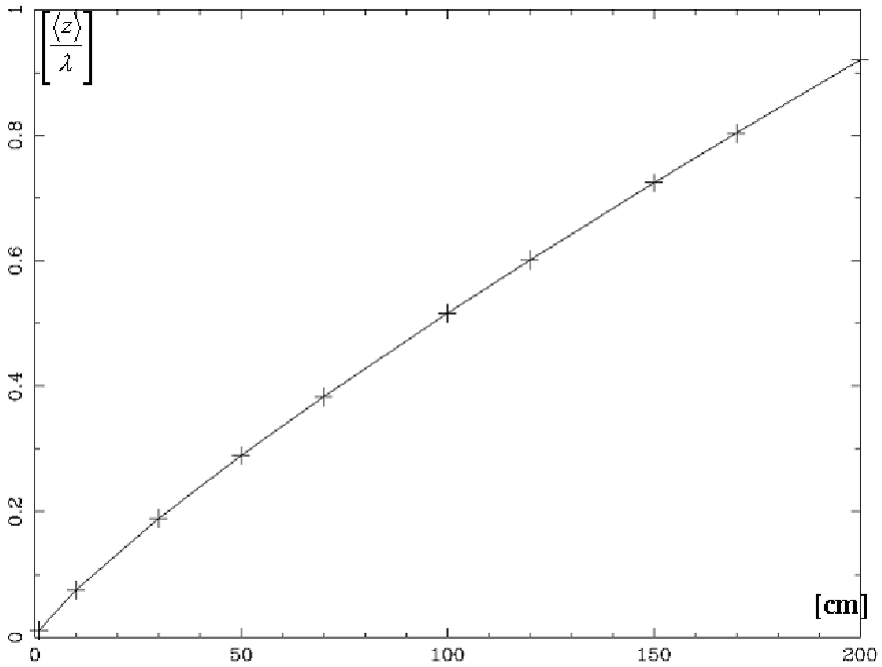

図 5.1: 岡山や福成寺での典型的な大気における 2 点間距離 r と両点間の相対波面誤差の関係。主鏡の両端 (r=150 cm) ではおよそ 0.8λ ほどの波面誤差があることになる。

5.3 赤外シミュレーターの限界等級

今回 DIMM を用いて測定したシーイングの値を使って、赤外シミュレーターを用いた aperture photometry(開口測光) における限界等級をシミュレーションしてみた。

波長 λ[Å] で m 等級の星を観測した時、口径 1 m 望遠鏡で、1 Å あたり 1 秒間に集められる光子数は以下の式から求められる (参考文献:Massey et al.ApJ,328,315,1988)。

$$N_\lambda = \frac{4.5 \times 10^{10}}{\lambda} \times 10^{-[\frac{(m+A_\lambda X)}{2.5}]} \qquad (5.6)$$

A_λ : 大気の減光率

X : $Airmass$

m : 等級

ここで、大気の減光率、Airmass は、天頂付近の測定を想定して、それぞれ 0.23、1 とする。また、m は今回 10、15、20、25 等級の 4 つの場合を求める。

また、S/N 比は以下の式から求められる。

$$\frac{S}{N} = \frac{N_\lambda}{\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_r^2 + \sigma_{sky}^2}} \tag{5.7}$$

$$\sigma_p : \text{電子数の統計誤差} = \sigma = \sqrt{N_\lambda} \tag{5.8}$$

$$\sigma_r : \text{読み出し誤差} = 4 \times \frac{\pi(1.5 \times \ FWHM)^2}{1\text{pixel の平方秒角}} \tag{5.9}$$

$$\sigma_{sky} : \text{バックグラウンド誤差} = N_{sky}\pi(1.5 \times \ FWHM)^2 \tag{5.10}$$

ここで、シーイング (FWHM) は岡山観測所内の移設候補地の平均中央値 1.3 arcsec とした。また、観測に用いる CCD として 13.5 × 12.5 μ m ピクセルのものを想定すると、1 mm あたり 11.27 arcsec で、1pixel あたり 0.152 arcsec の角距離に対応する。また、スカイ輝度 N_{sky} の導出には、岡山や福成寺の測定で得られた 20 $mag/arcsec^2$ を用いた。CCD の読み出し誤差は $4e^-$ とし、装置の全効率 (反射率、透過率、検出器効率の積) は 50 %とした。

以上の式から図 5.2 が求められた。

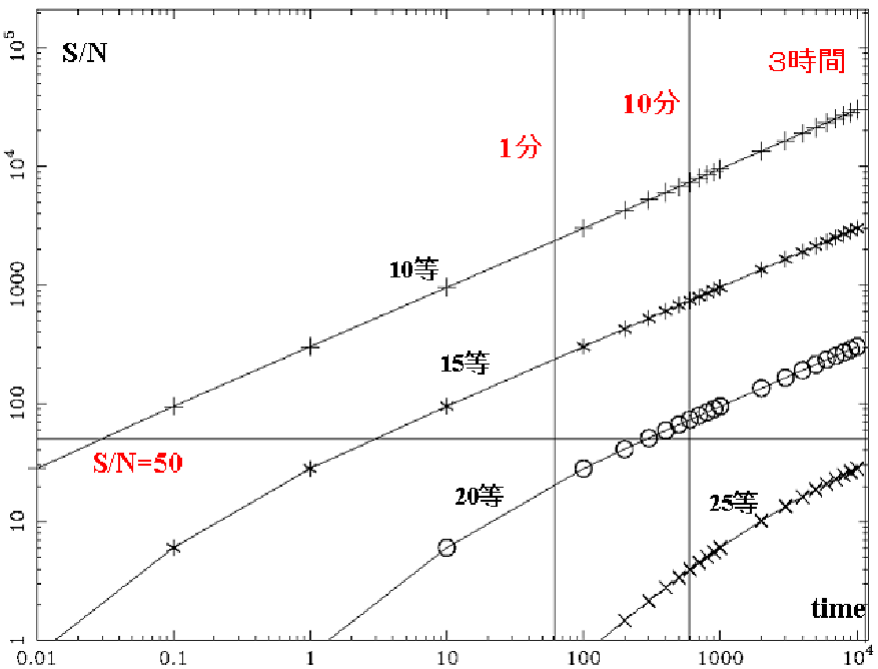

図 5.2: 赤外シミュレーターを移設候補地の設置した場合の限界等級 (縦軸 S/N 比、横軸 積分時間 秒)

我々が観測で必要とする S/N 比は、GRB 等の突発天体を測定する場合、S/N=10(Δ=0.1 等級) でよいが、月の影響等を考えて安全のため S/N=50 とする。また、連続的

な観測を行う必要があることから、典型的な積分時間は 1 分から 10 分を想定している。

すると、この図から積分時間が 1 分の時の限界等級は約 18 等級、10 分の時は約 20.5 等級、3 時間の時は約 23.5 等級となる。つまり、GRB の爆発初期の連続観測においては、20-21 等級まで、および静穏期の長時間露光による観測では 23.5 等級までの測定が可能と見積もられる。

5.4 シーイングと標高の相関について

世界的に良いシーイング環境にあるサイトとは、おしなべて標高が高いところにある。なぜなら天体を見透す際の大気の層が薄いことや湿度が低く安定している等のメリットがあるからである。

そこで、今回 DIMM を用いて岡山・広島県で行ったシーイング結果と、世界のシーイングが良いと言われている場所とのシーイングと標高の相関を調べてみた。

その結果、以下の図のようになった。

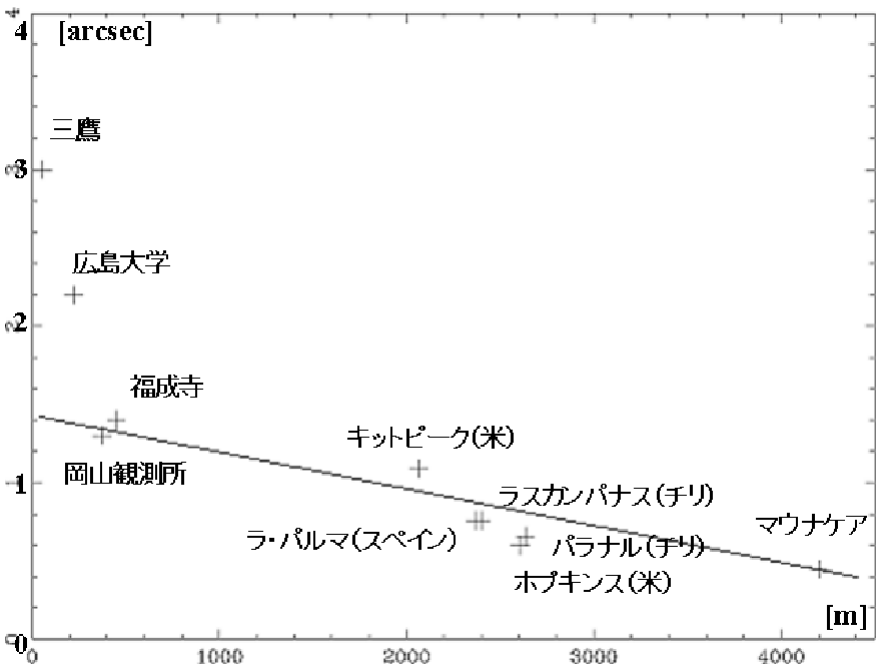

図 5.3: 標高とシーイングの相関図

この図からマウナケアやラスカンパナスなどの世界的に良いシーイング環境にある場所は標高が高くなるほどシーイングが良くなるという linear な関係にあるようである。標高とシーイングとの関係は単純にはあらわすことができないが、ここでは目安として直線を引いてみた。この結果から、岡山観測所や福成寺は、標高が低いわりに良いシーイング環境にあると言える。高度が低いとアクセスが格

段に容易になり、メンテナンスや機能更新にも有利である。この良好なサイト条件を活かした望遠鏡の活用に期待したい。

付 録A　2003年5月~8月の岡山天体物理観測所内でのシーイング頻度と累積割合

§4.2.3 に関連して、各地点ごとにまとめたシーイング頻度ヒストグラムと累積割合を以下に列挙する。5 月 1、27、28 日は前に書いたように太陽クーデドームの屋上にてシーイング測定を行った。太陽クーデドームで測定した 3 晩のシーイングの合計のヒストグラムと累積割合は図 A.1、図 A.2 のようになった。

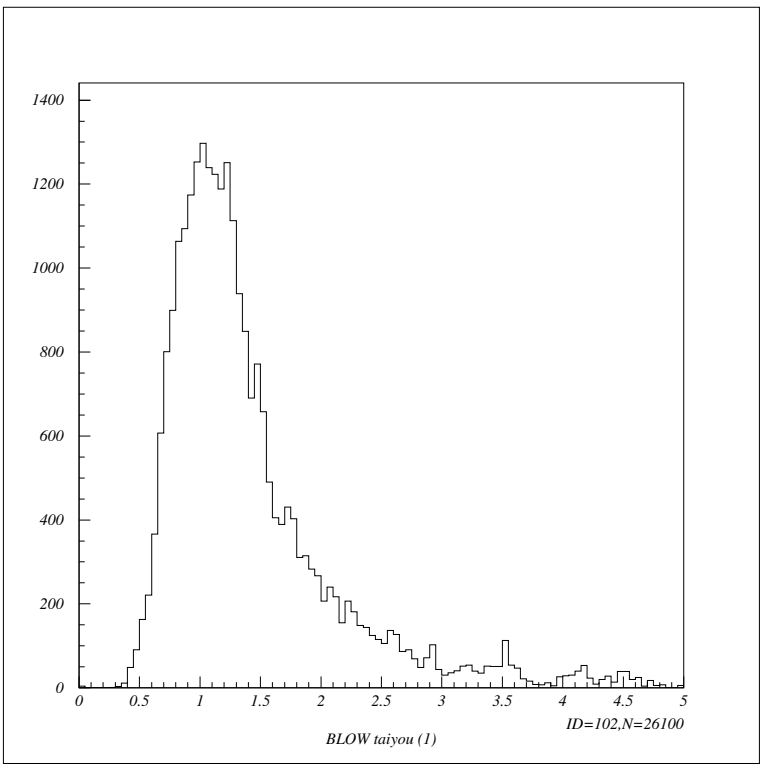

図 A.1: 5 月 1、27、28 日 太陽クーデドームでのシーイングヒストグラム (縦軸頻度、横軸 シーイング arcsec)

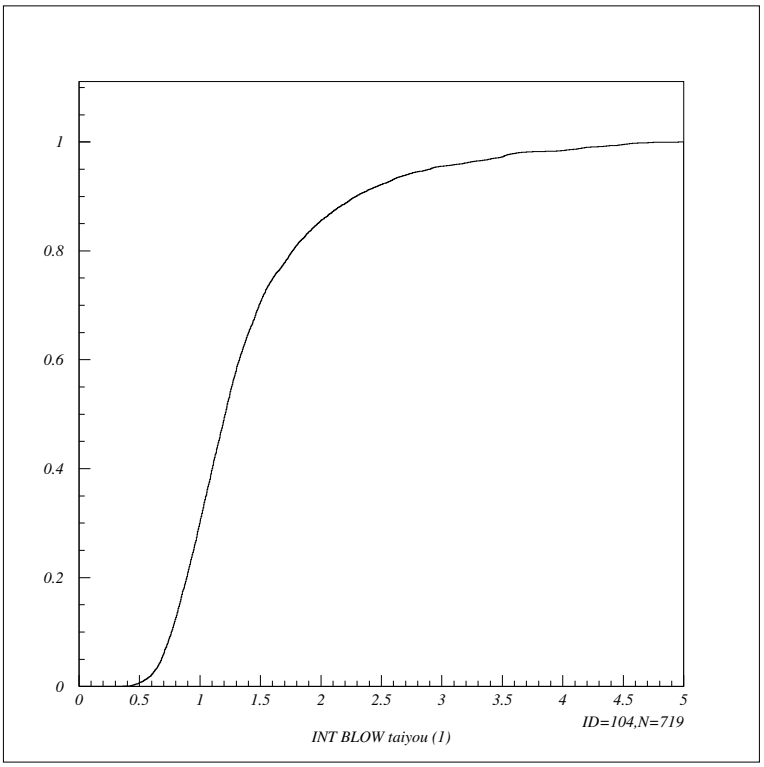

図 A.2: 5 月 1、27、28 日 太陽クーデドームでのシーイングの累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 シーイング arcsec) の合計

5 月 29 日は今後京都大学 DIMM を設置して、定期的に岡山天体物理観測所のシーイングを測定するために建設された DIMM ドームにてシーイング測定を行った。DIMM ドームで測定したシーイングのヒストグラムと累積割合は図 A.3 のようになった。

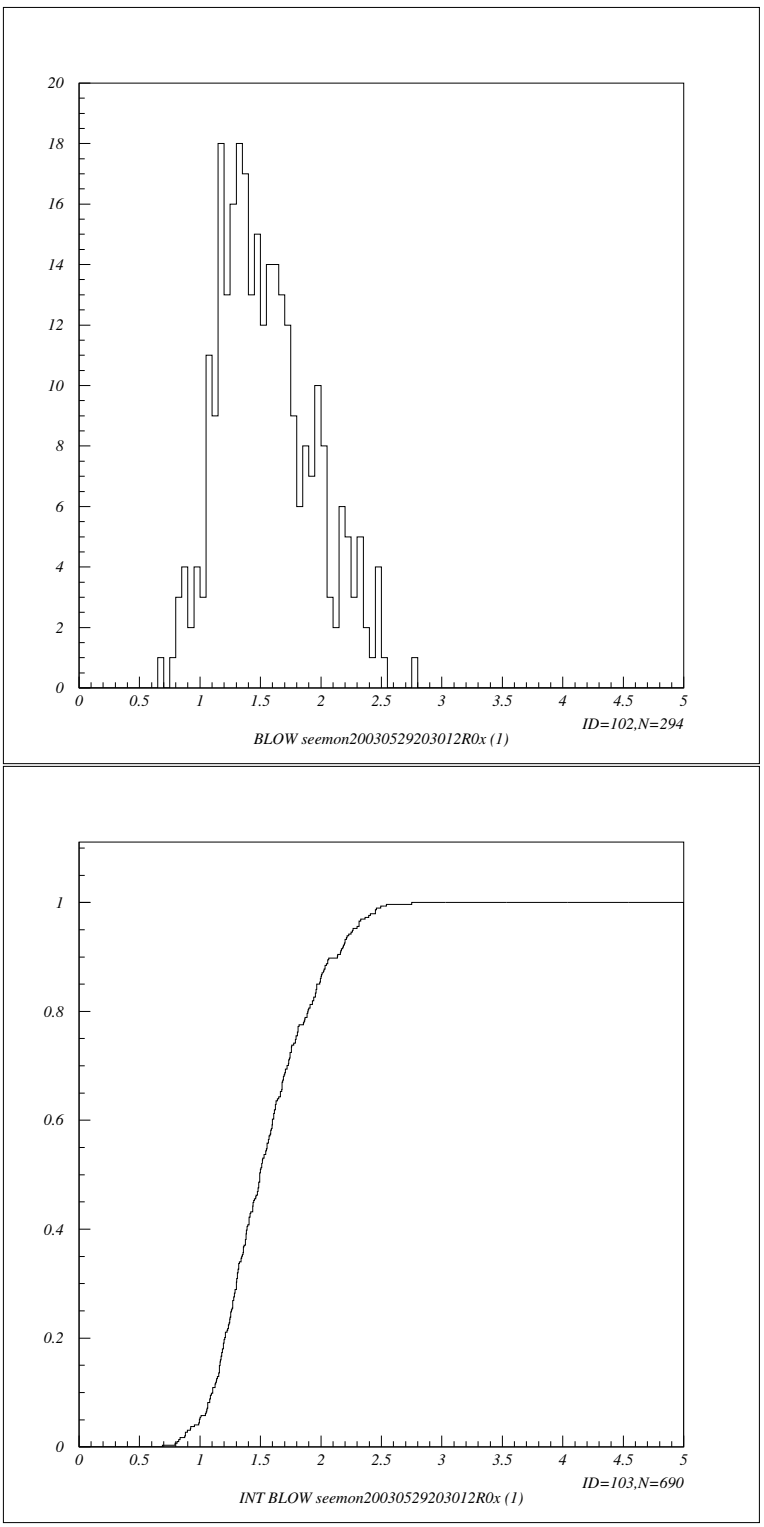

図 A.3: 5 月 29 日 DIMM ドームでのシーイングヒストグラム (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec)、累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 シーイング arcsec)

7月31日、8月1日はCTタワーの下にてシーイング測定を行った。。CTタワーの下で測定した2晩のシーイングの合計のヒストグラムと累積割合は図A.4、図A.5のようになった。

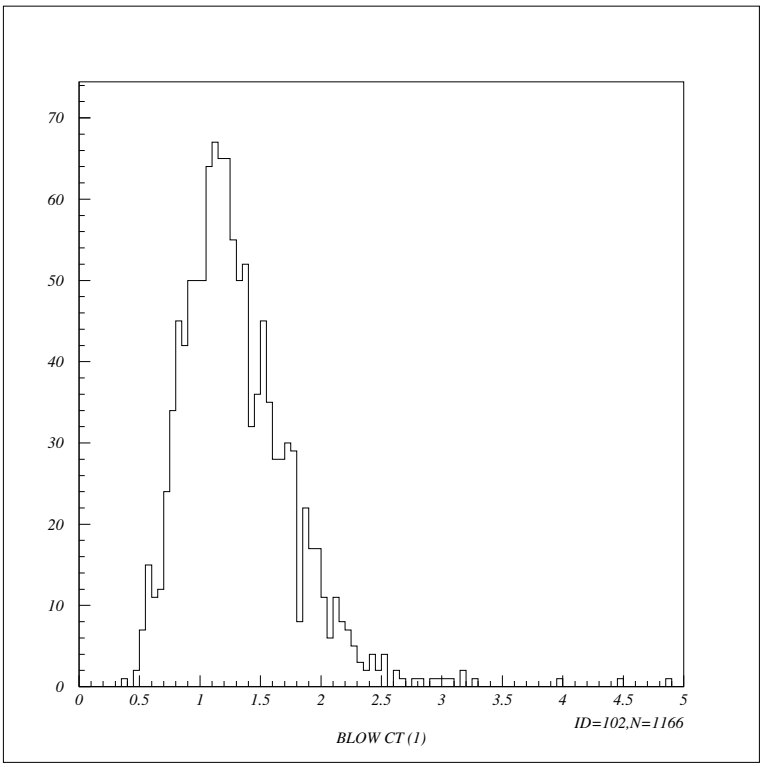

図 A.4: 7月31日、8月1日 CTタワーでのシーイングヒストグラム (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec)

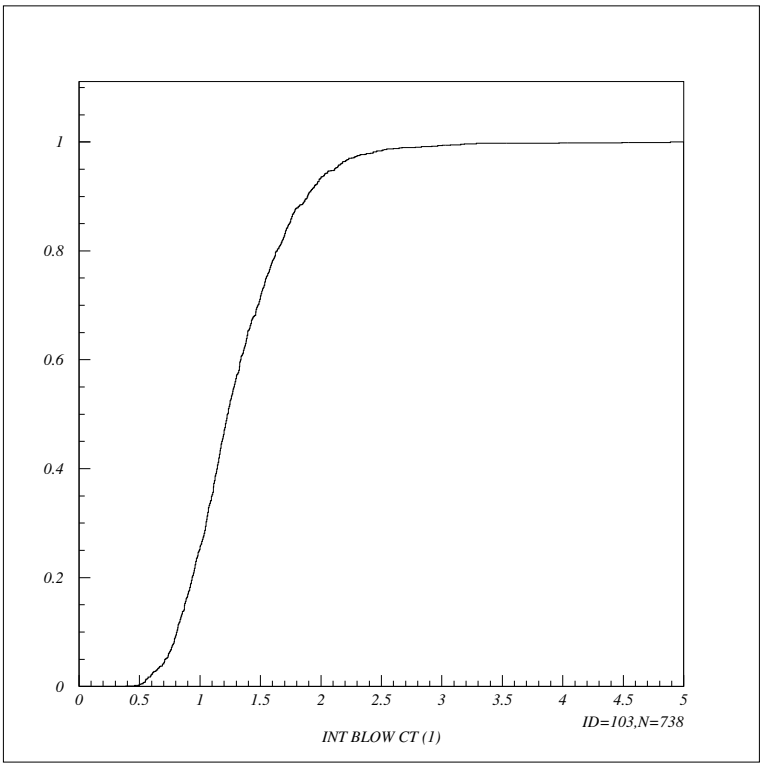

図 A.5: 7 月 31 日、8 月 1 日 CT タワーでのシーイング累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 シーイング arcsec) の合計

5 月 2 日、8 月 2 日は岡山天体物理観測所内の赤外シミュレーター移設候補地にてシーイング測定を行った。移設候補地で測定した 2 晩のシーイングの合計のヒストグラムと累積割合は図 A.6 のようになった。

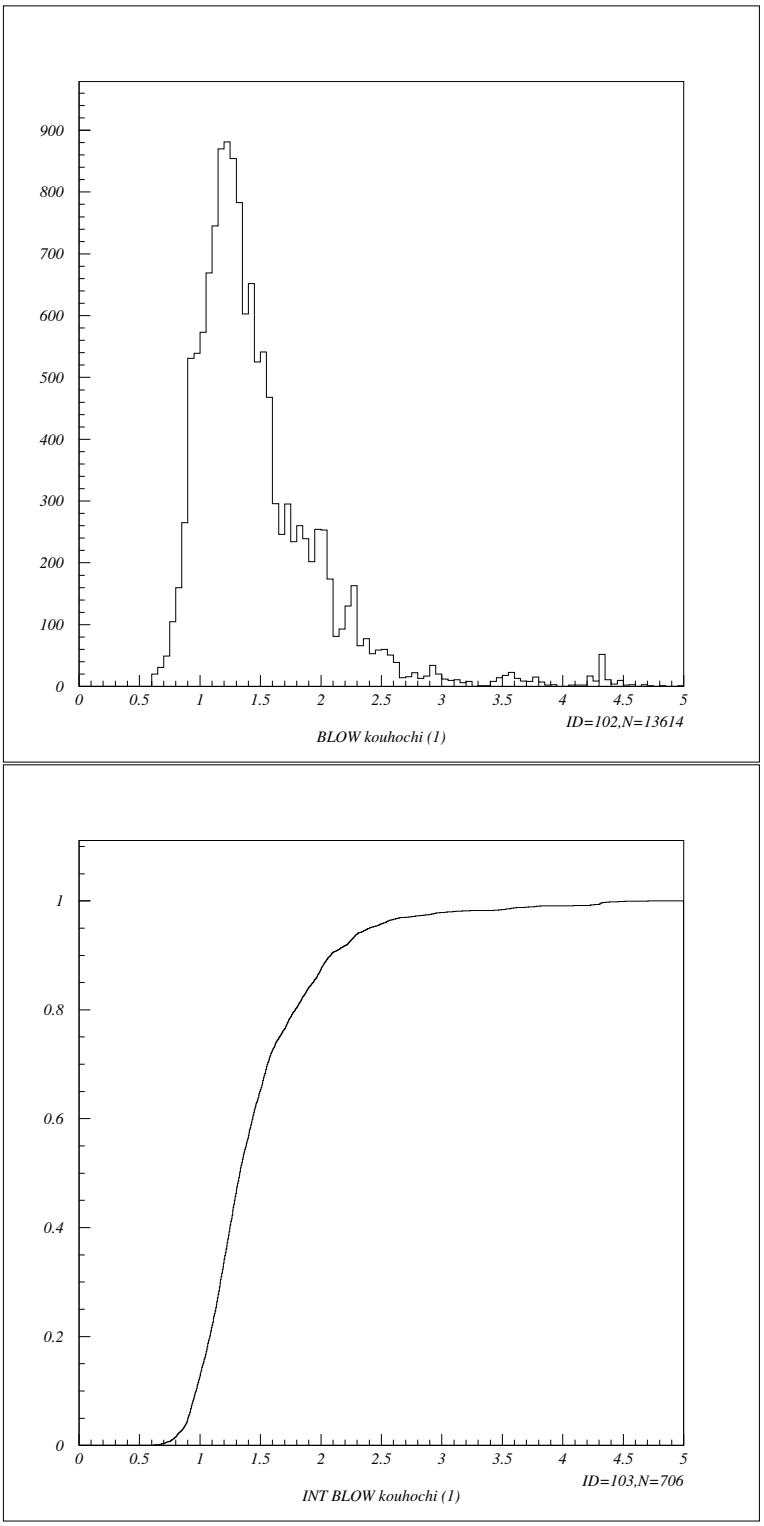

図 A.6: 5 月 2 日、8 月 2 日 岡山天体物理観測所内の移設候補地でのシーイングヒストグラム (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec)、累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 シーイング arcsec)

付 録B　2003年8月 ~ 12月の広島県内各地でのシーイング頻度と累積割合

§4.3 に関連する測定データを以下に示す。8 月 6 日は広島大学教育学部屋上に設置されている 50cm 望遠鏡ドームの下にてシーイング測定を行った。その結果は図 B.1、図 B.2 のようになった。

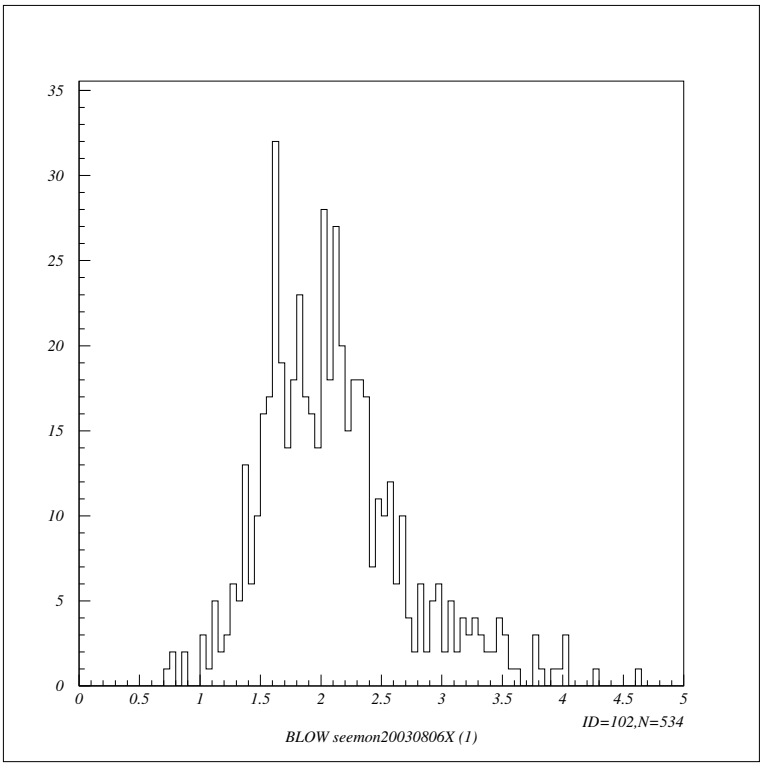

図 B.1: 8 月 6 日 広島大学教育学部屋上でのシーイングヒストグラム (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec)

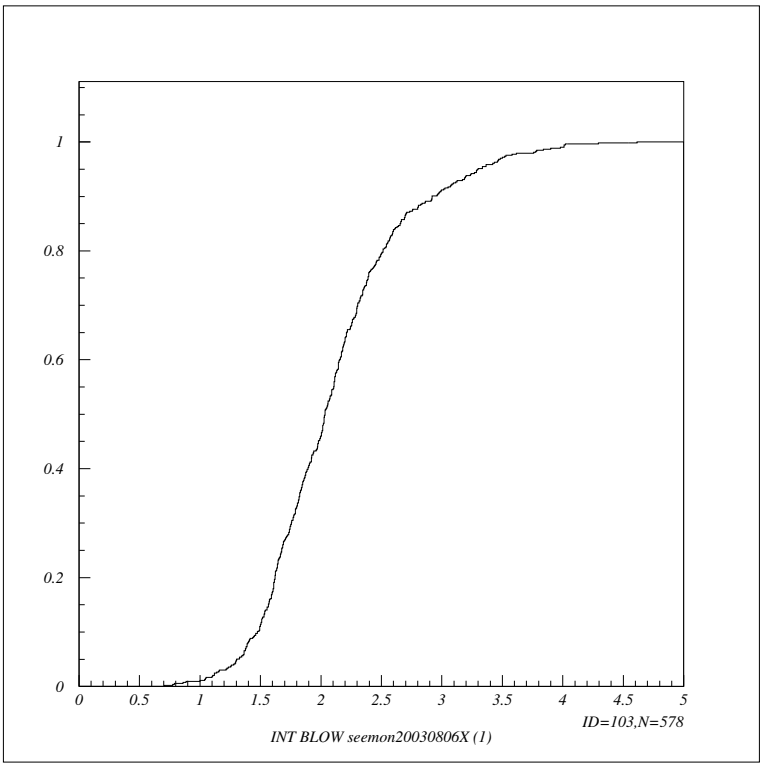

図 B.2: 8 月 6 日 広島大学教育学部屋上でのシーイング累積割合 (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec) の合計

9 月 16、17 日は広島大学理学部屋上にてシーイング測定を行った。その結果は図 B.3 のようになった。

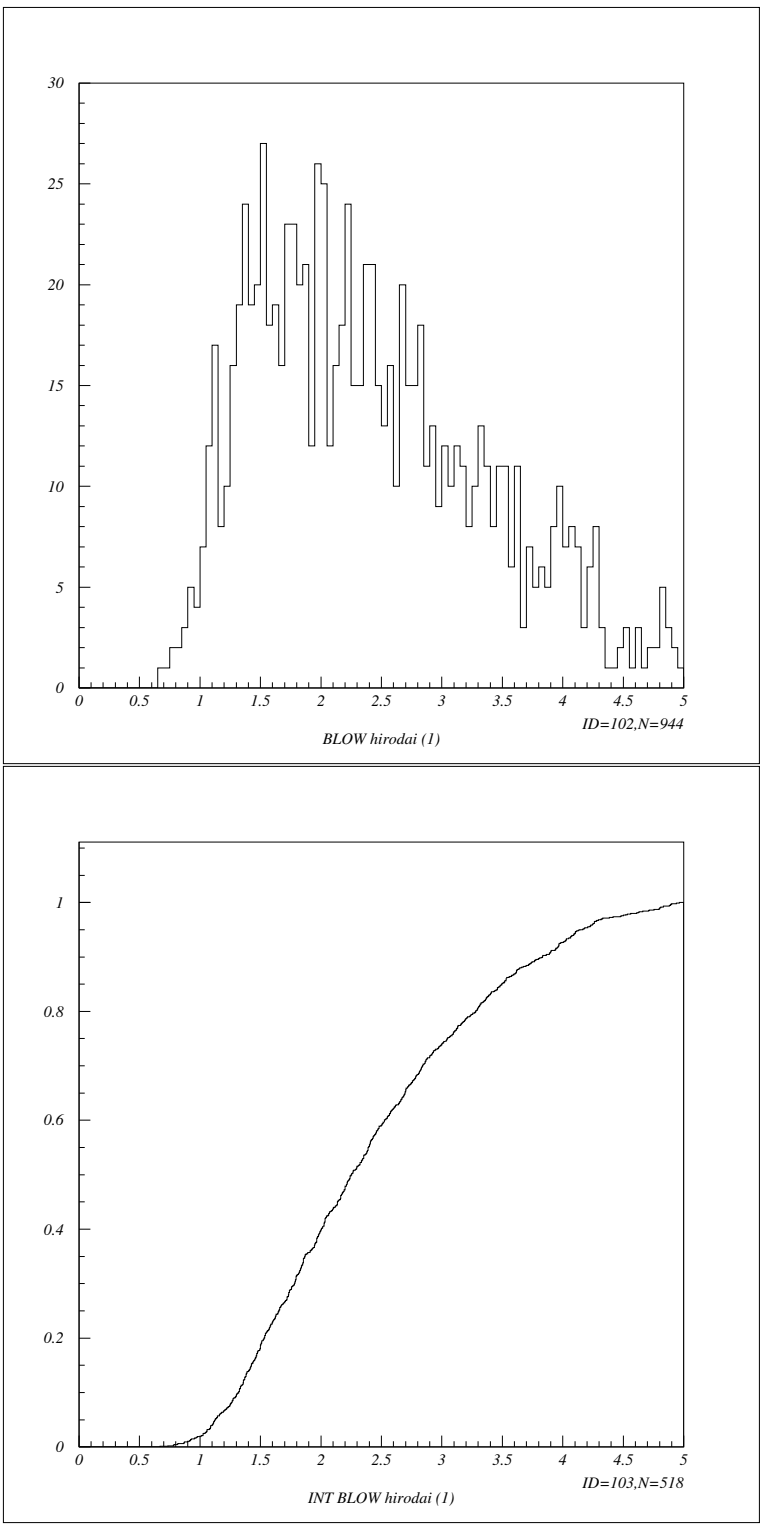

図 B.3: 9月16日、17日 広島大学理学部屋上でのシーイングヒストグラム (縦軸頻度、横軸 シーイング arcsec)、累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 シーイング arcsec)

9 月 26 日、10 月 8 日は豊栄町にある板鍋山にてシーイング測定を行った。板鍋山で測定した 2 晩のシーイングの合計のヒストグラムと累積割合は図 B.4、図 B.5 のようになった。

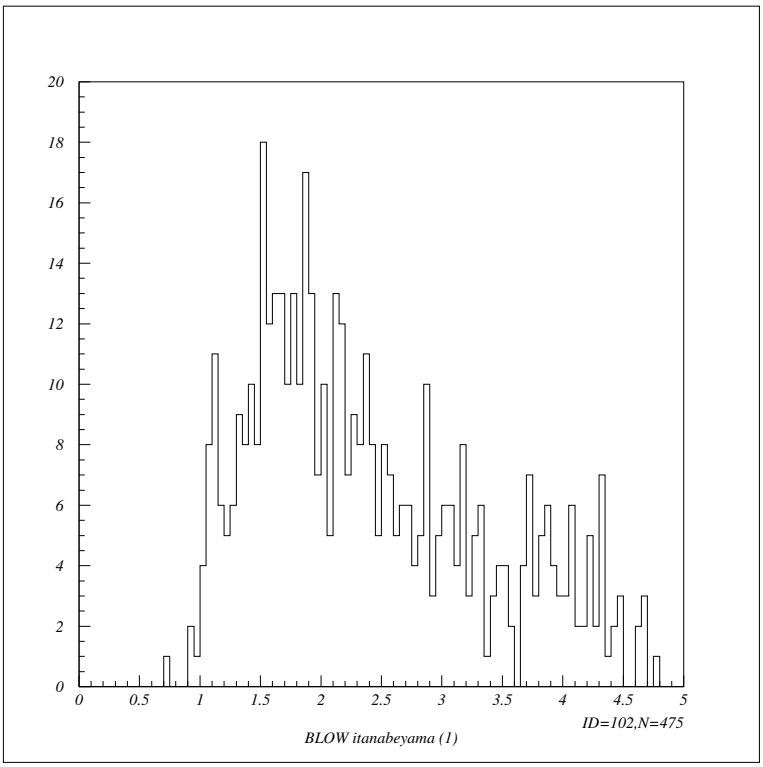

図 B.4: 9 月 26 日、10 月 8 日 板鍋山 (豊栄町) でのシーイングヒストグラム (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec)

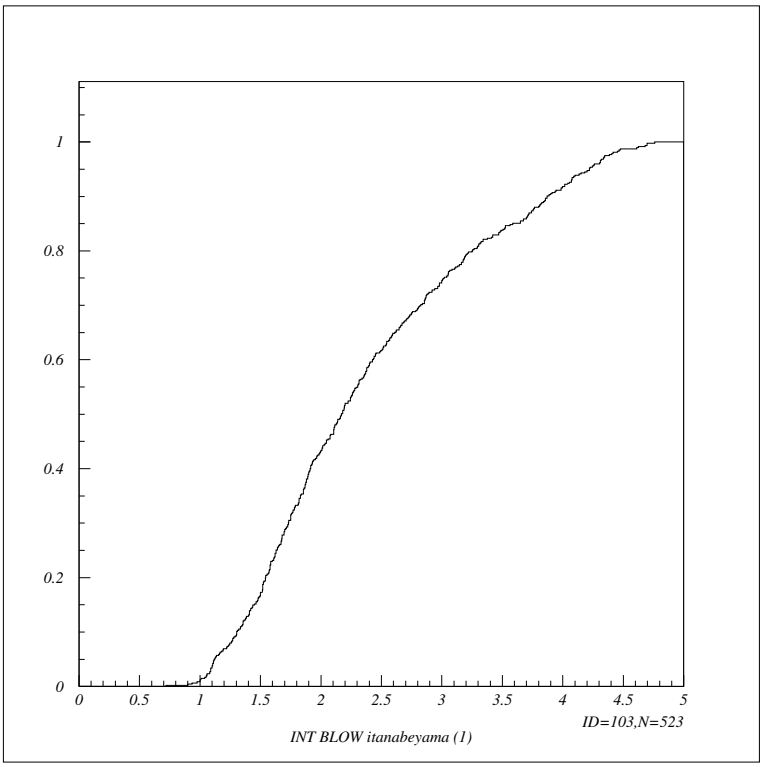

図 B.5: 9 月 26 日、10 月 8 日 板鍋山 (豊栄町) でのシーイング累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 シーイング arcsec) の合計

12 月 1、3、8、10、14、16、17、24、25 日は東広島市にある福成寺の近くにてシーイング測定を行った。福成寺で測定した 9 晩のシーイングの合計のヒストグラムと累積割合は図 B.6 のようになった。

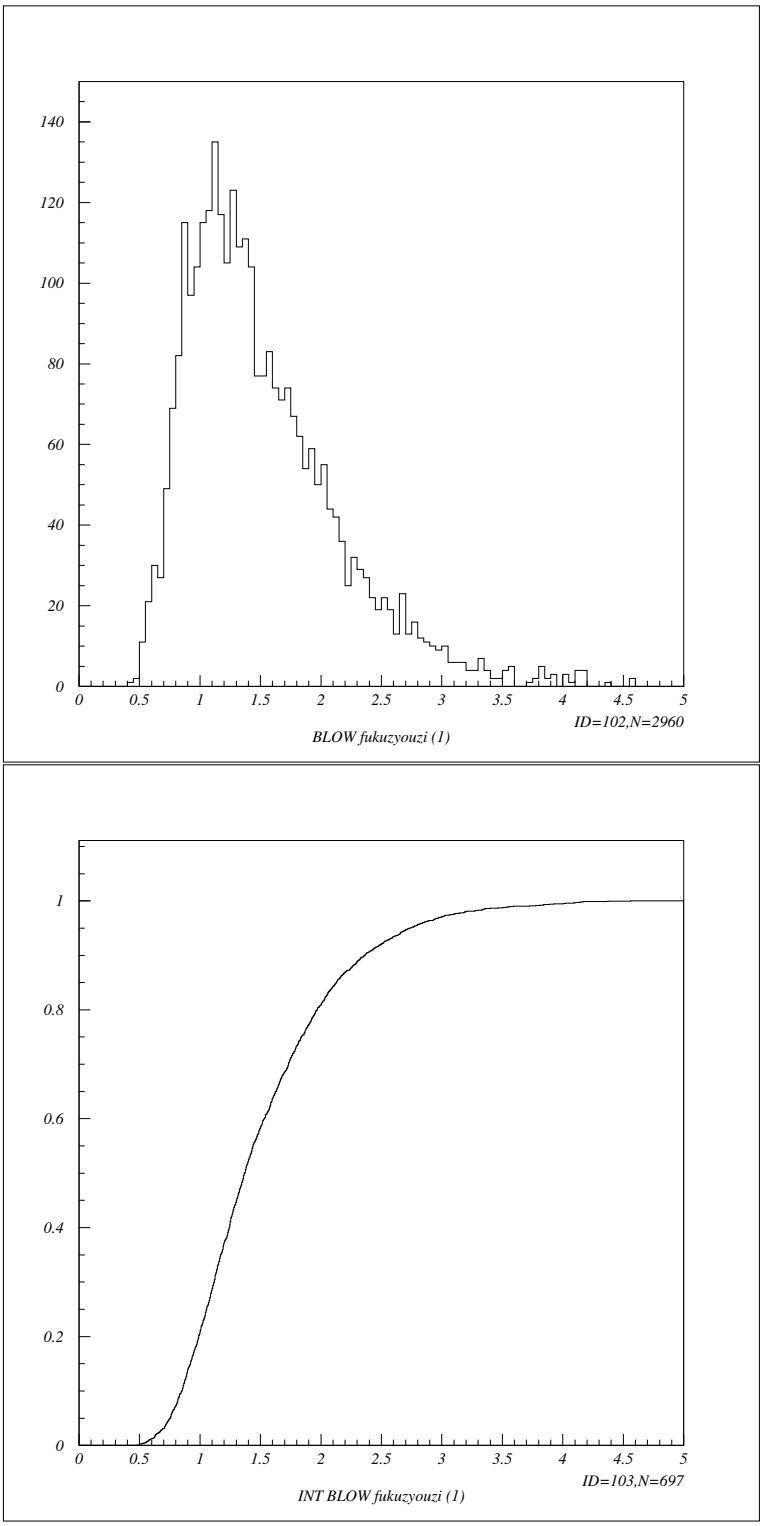

図 B.6: 12 月 1、3、8、10、14、16、17、24、25 日 福成寺 (東広島市) でのシーイングヒストグラム (縦軸 頻度、横軸 シーイング arcsec)、累積割合 (縦軸累積割合、横軸 シーイング arcsec)

12 月 2、4 日は安芸津町にある保野山にてシーイング測定を行った。保野山で測定した 2 晩のシーイングの合計のヒストグラムと累積割合は図 B.7、図 B.8 のようになった。

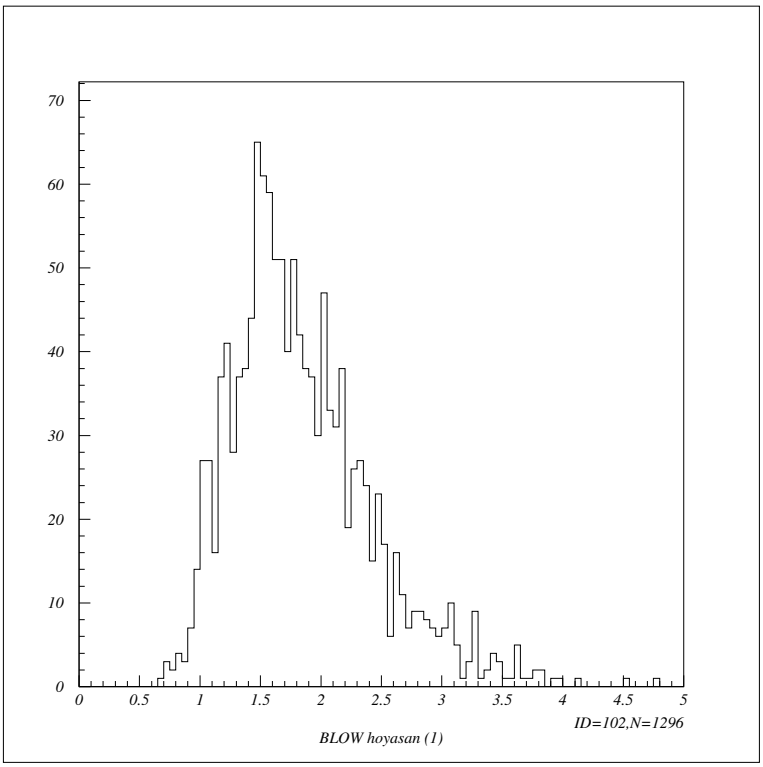

図 B.7: 12 月 2 日、4 日 保野山 (安芸津町) でのシーイングヒストグラム (縦軸 count 数、横軸 arcsec)

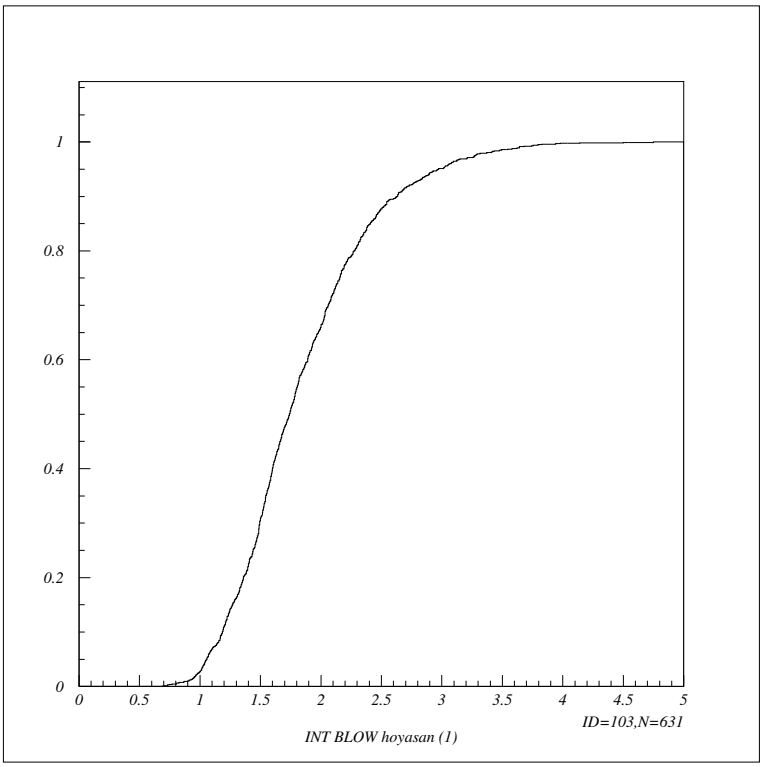

図 B.8: 12 月 2 日、4 日 保野山 (安芸津町) でのシーイング累積割合 (縦軸 累積割合、横軸 arcsec) の合計

付 録C　岡山天体観測所における風とシーイングの時間変動

§4.4.1 の捕捉として、シーイングと風速、風向の測定データを以下に列挙する。風速、風向については岡山天体物理観測所内の 188cm 望遠鏡ドーム横に設置されている気象モニターのデータを使用したため、どの日もシーイング測定地点と気象モニターの設置場所は少し離れている。(左図はシーイングの時間変動のグラフで、縦軸がシーイング arcsec、横軸が時間 hour である。中図は風速の時間変動のグラフで、縦軸が風速 m/s、横軸が時間 hour である。右図は風向の時間変動のグラフで、縦軸が風向、横軸が時間 hour である。)

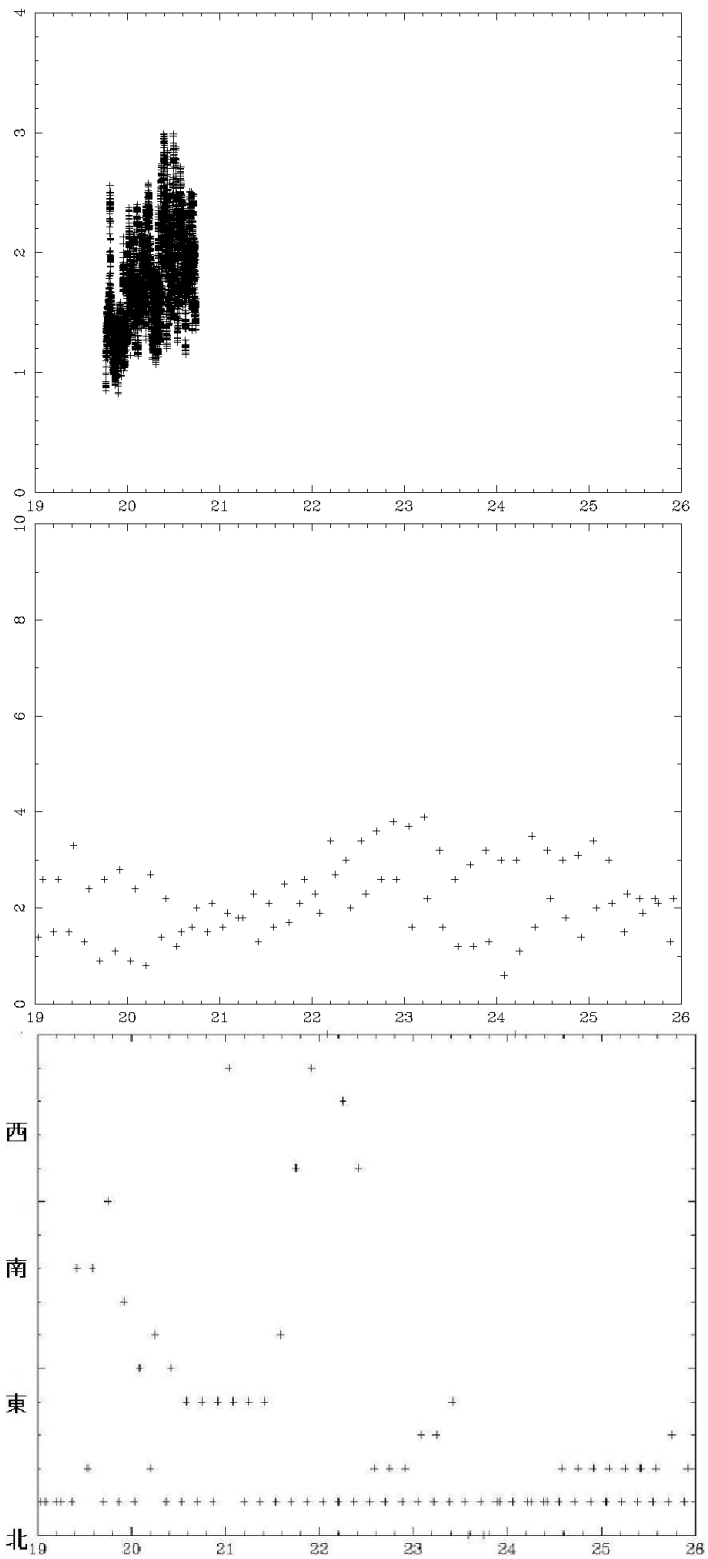

図 C.1: 2002 年 8 月 19 日のシーイング・風速・風向の時間変動

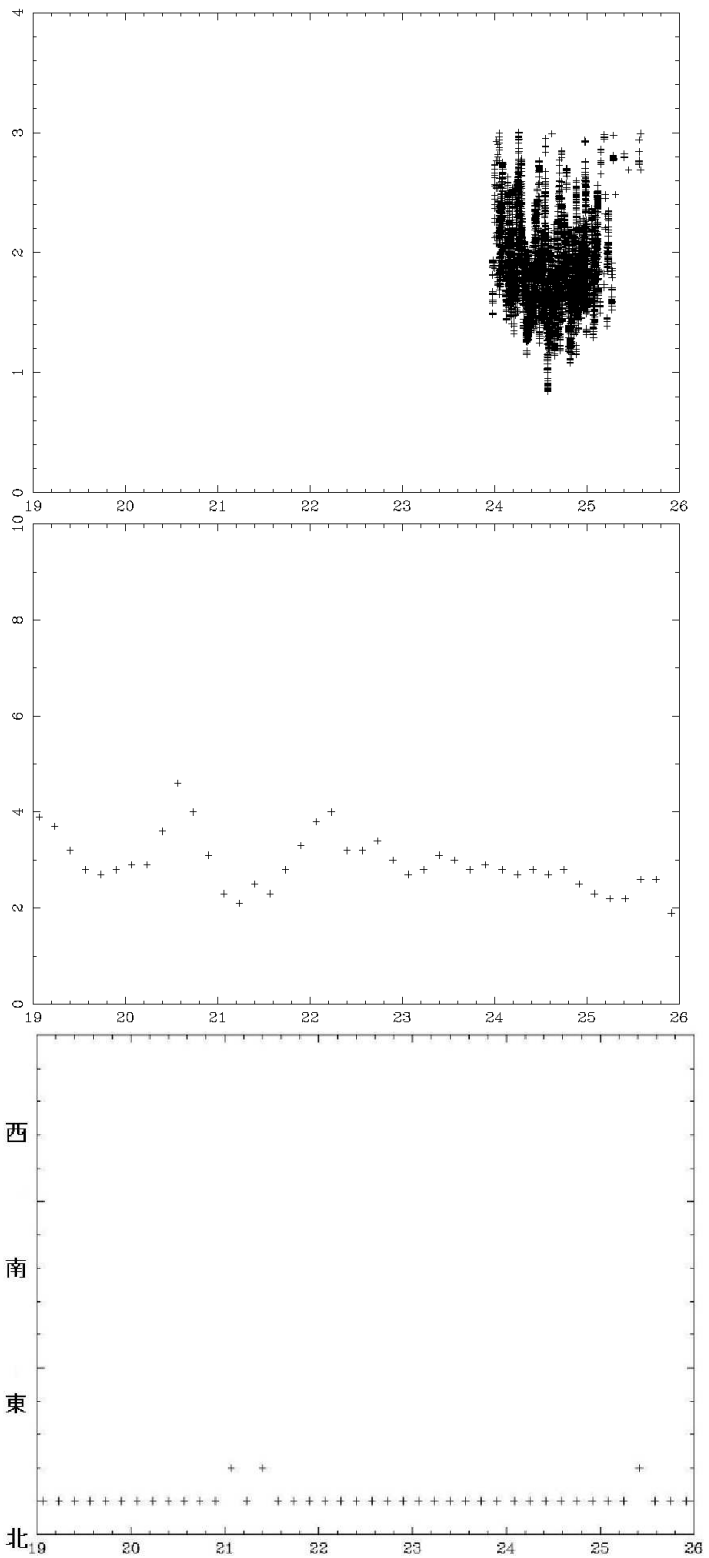

図 C.2: 2002 年 8 月 21 日のシーイング・風速・風向の時間変動

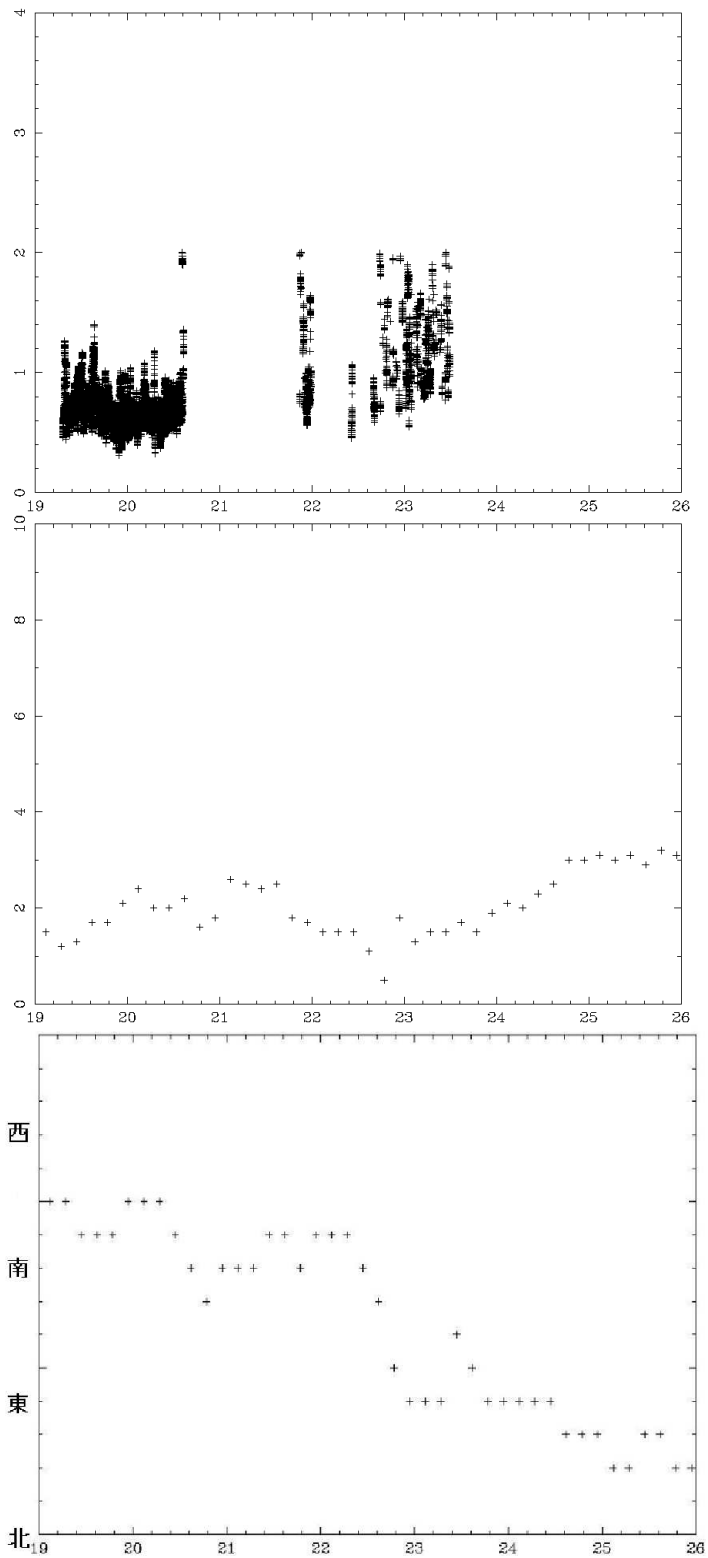

図 C.3: 2002 年 8 月 22 日のシーイング・風速・風向の時間変動

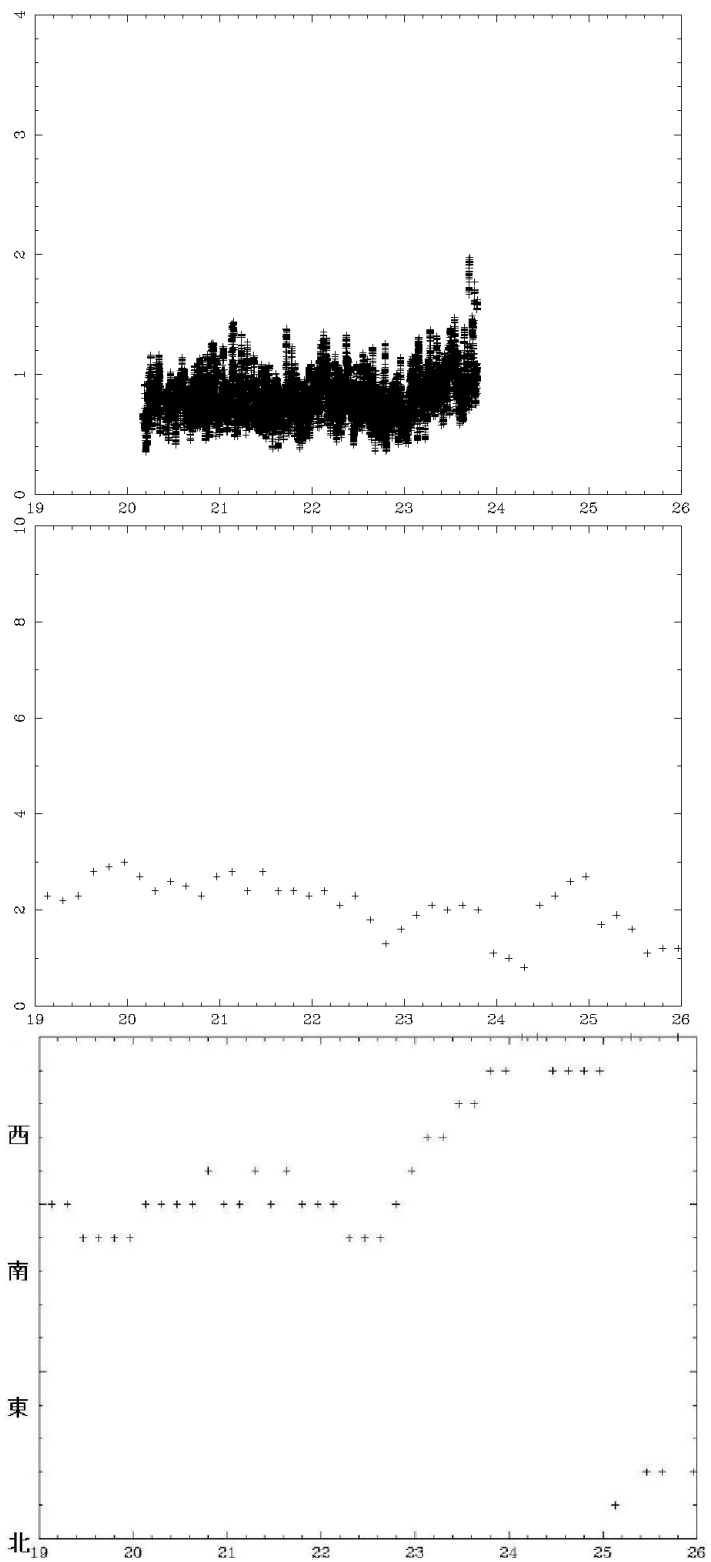

図 C.4: 2002 年 9 月 2 日のシーイング・風速・風向の時間変動

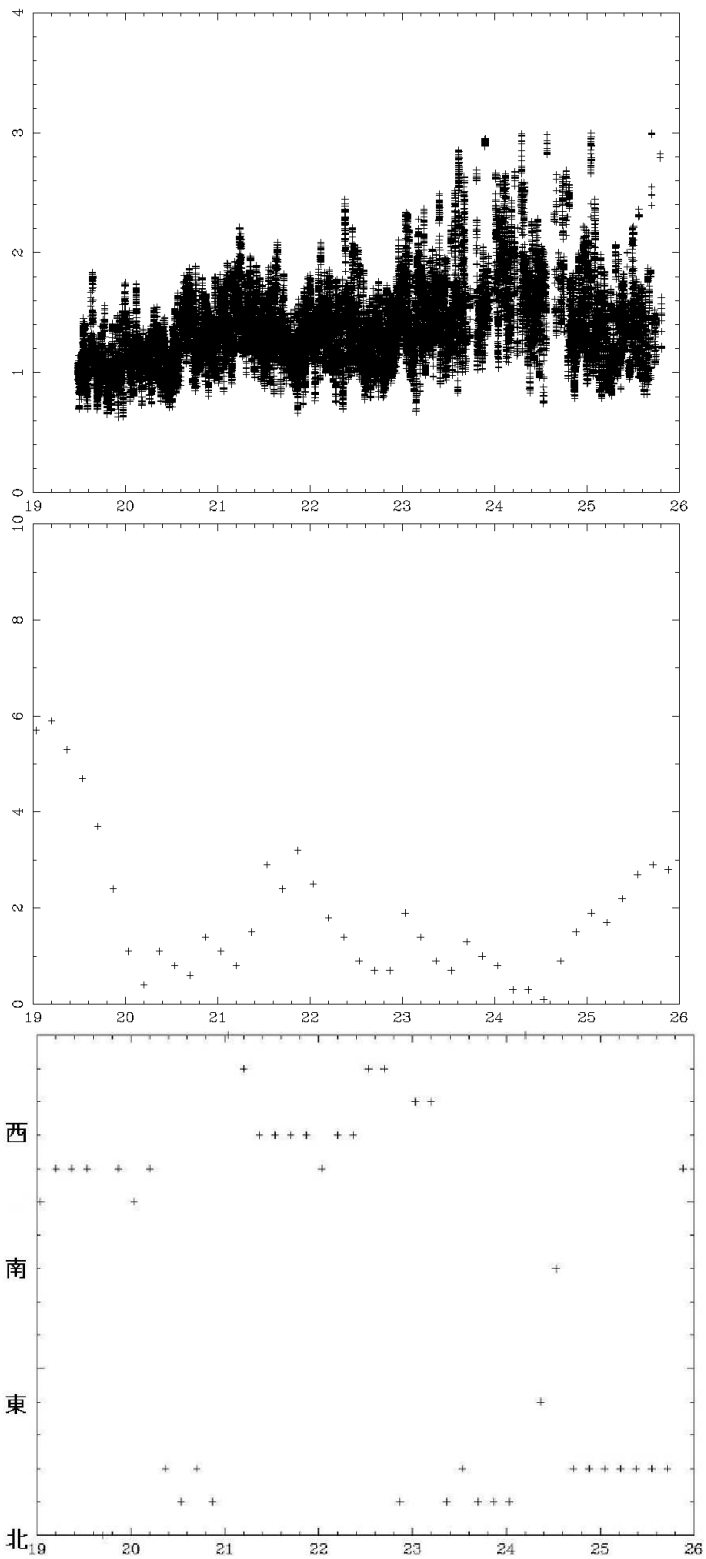

図 C.5: 2002 年 9 月 5 日のシーイング・風速・風向の時間変動

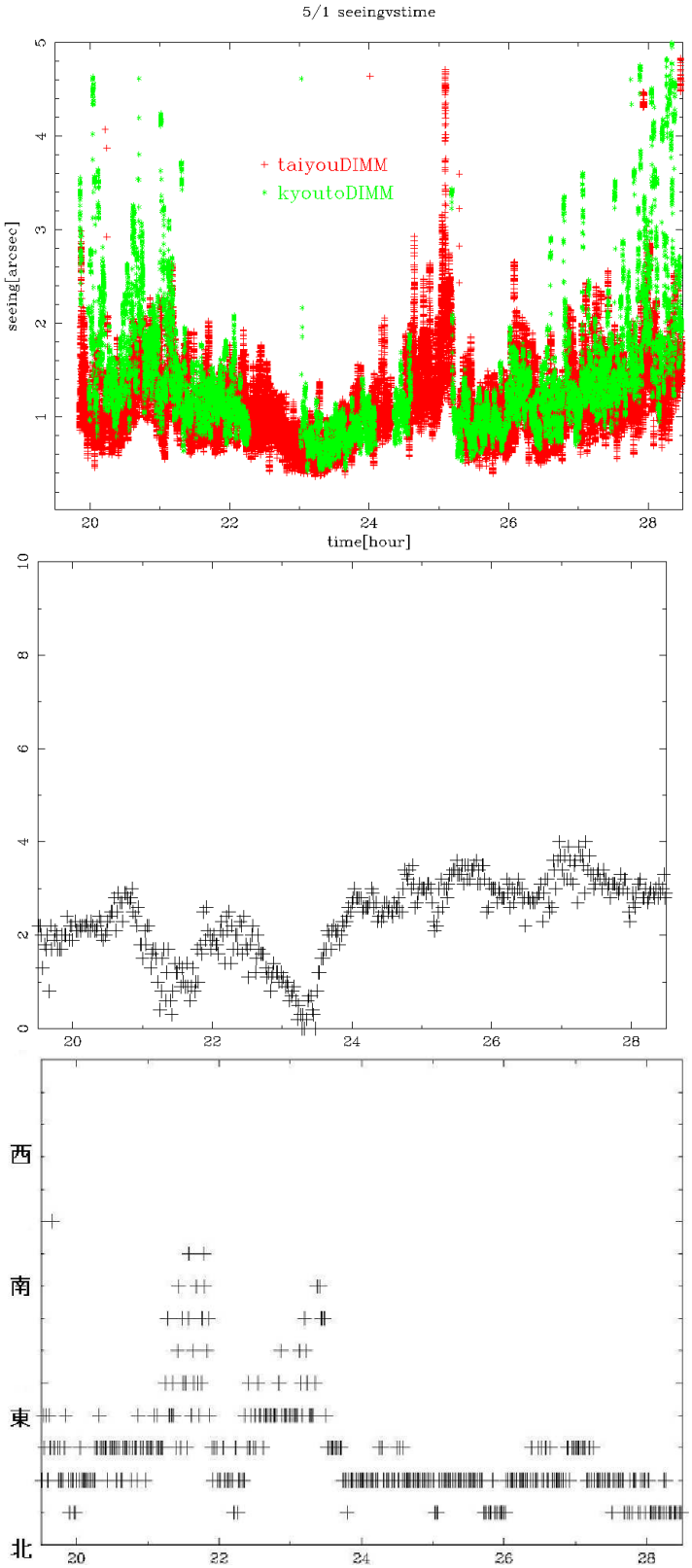

図 C.6: 2003 年 5 月 1 日のシーイング・風速・風向の時間変動。この日のシーイングと風速の相関については図 4.21 に載せた通りである。

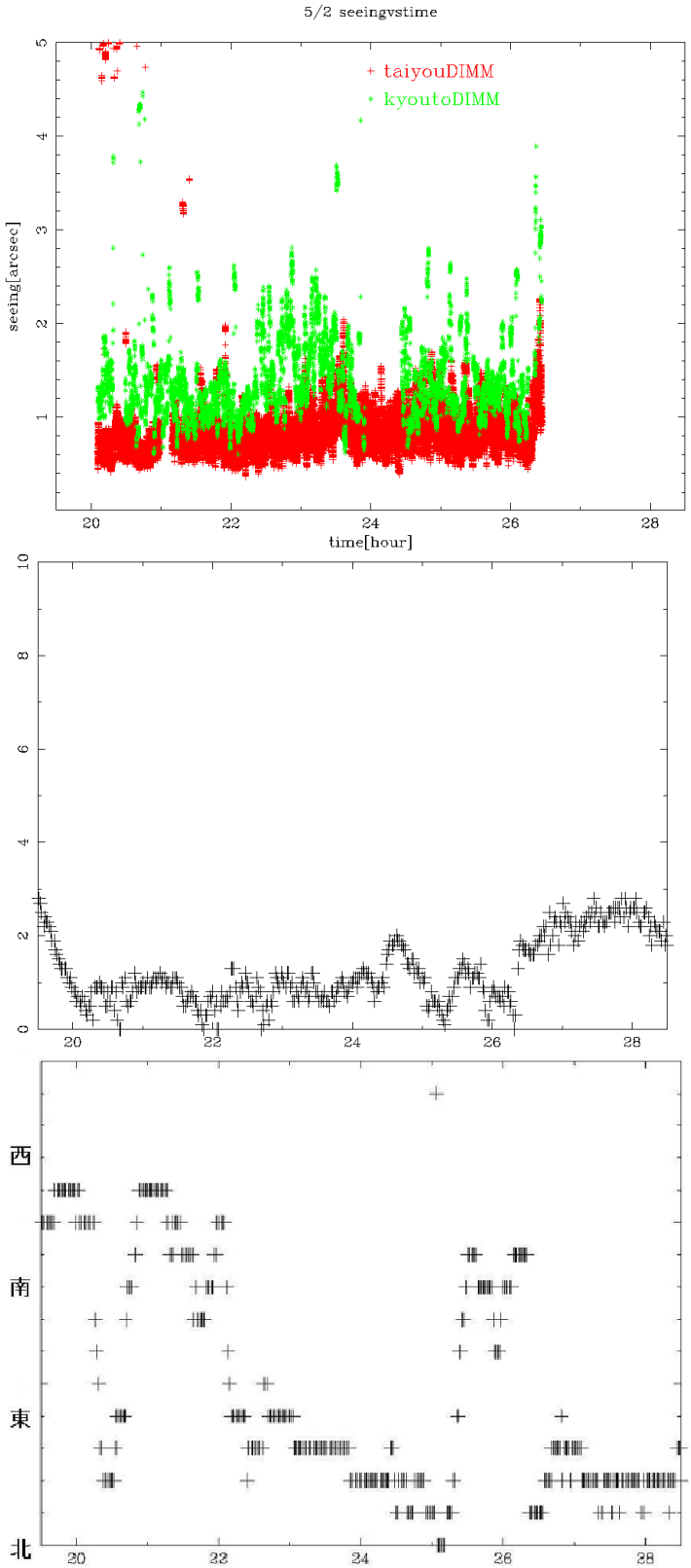

図 C.7: 2003 年 5 月 2 日のシーイング・風速・風向の時間変動

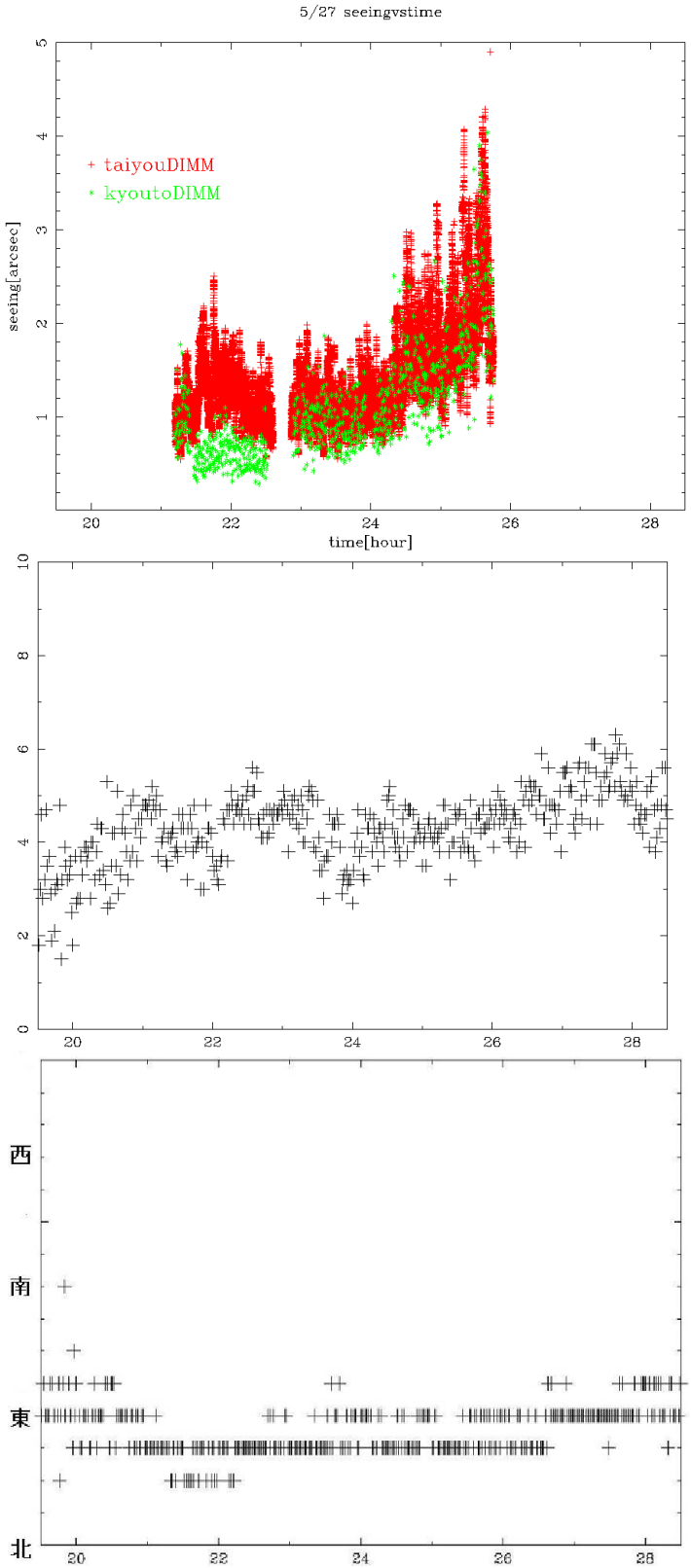

図 C.8: 2003 年 5 月 27 日のシーイング・風速・風向の時間変動

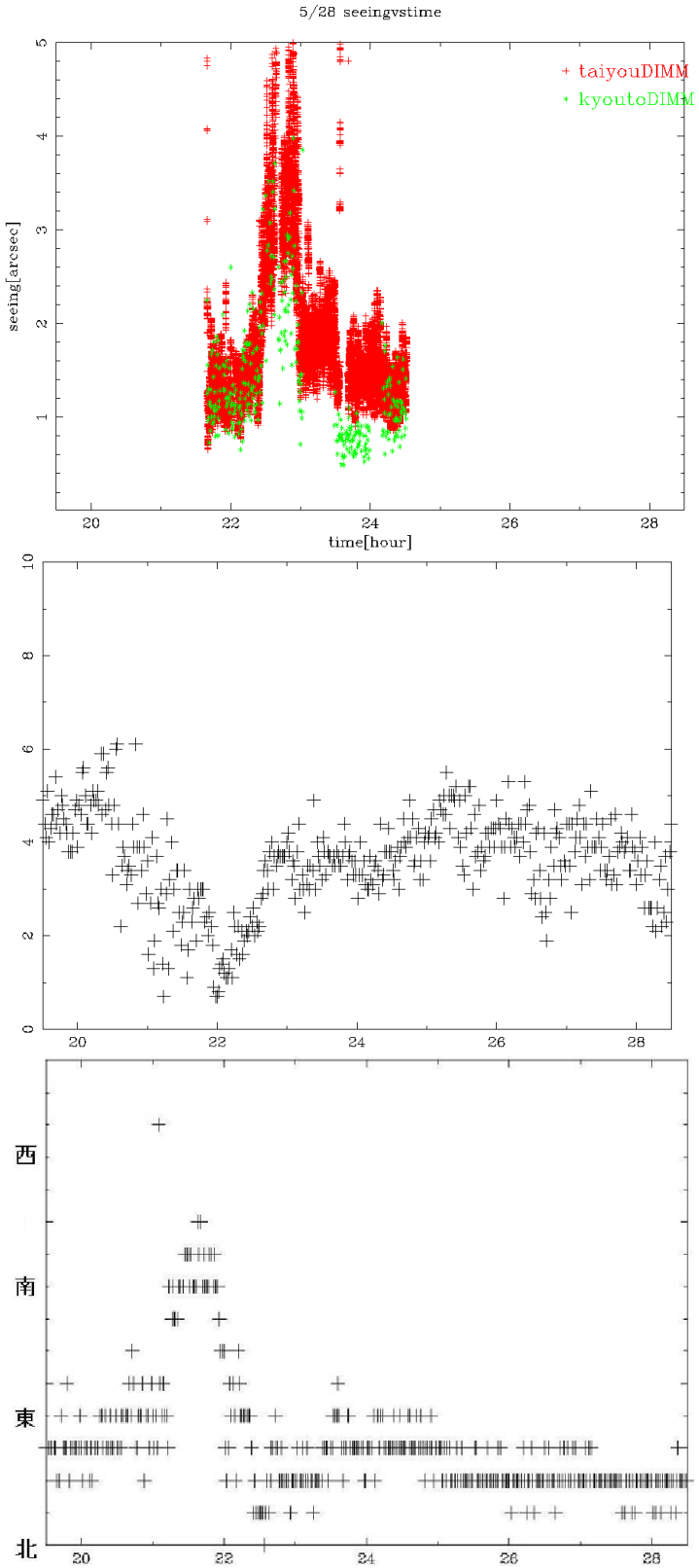

図 C.9: 2003 年 5 月 28 日のシーイング・風速・風向の時間変動

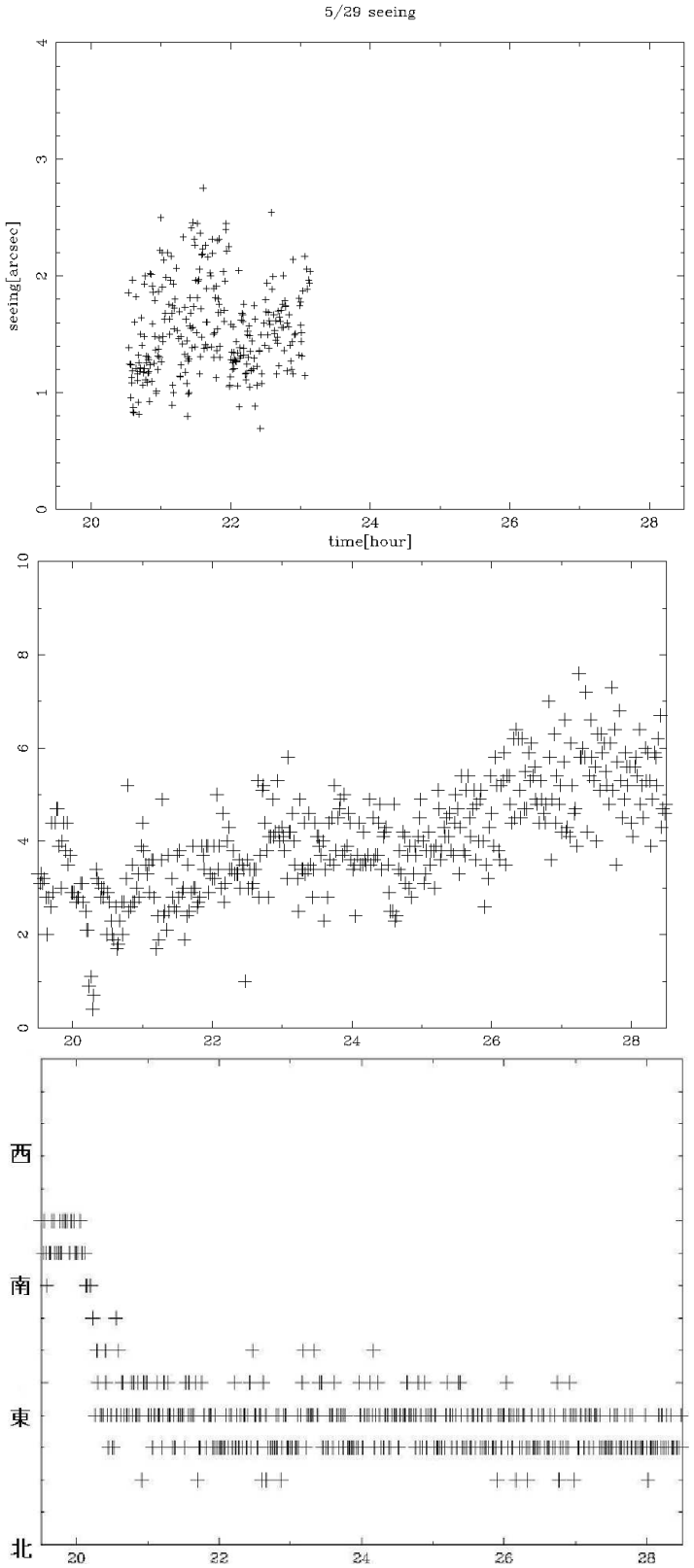

図 C.10: 2003 年 5 月 29 日のシーイング・風速・風向の時間変動

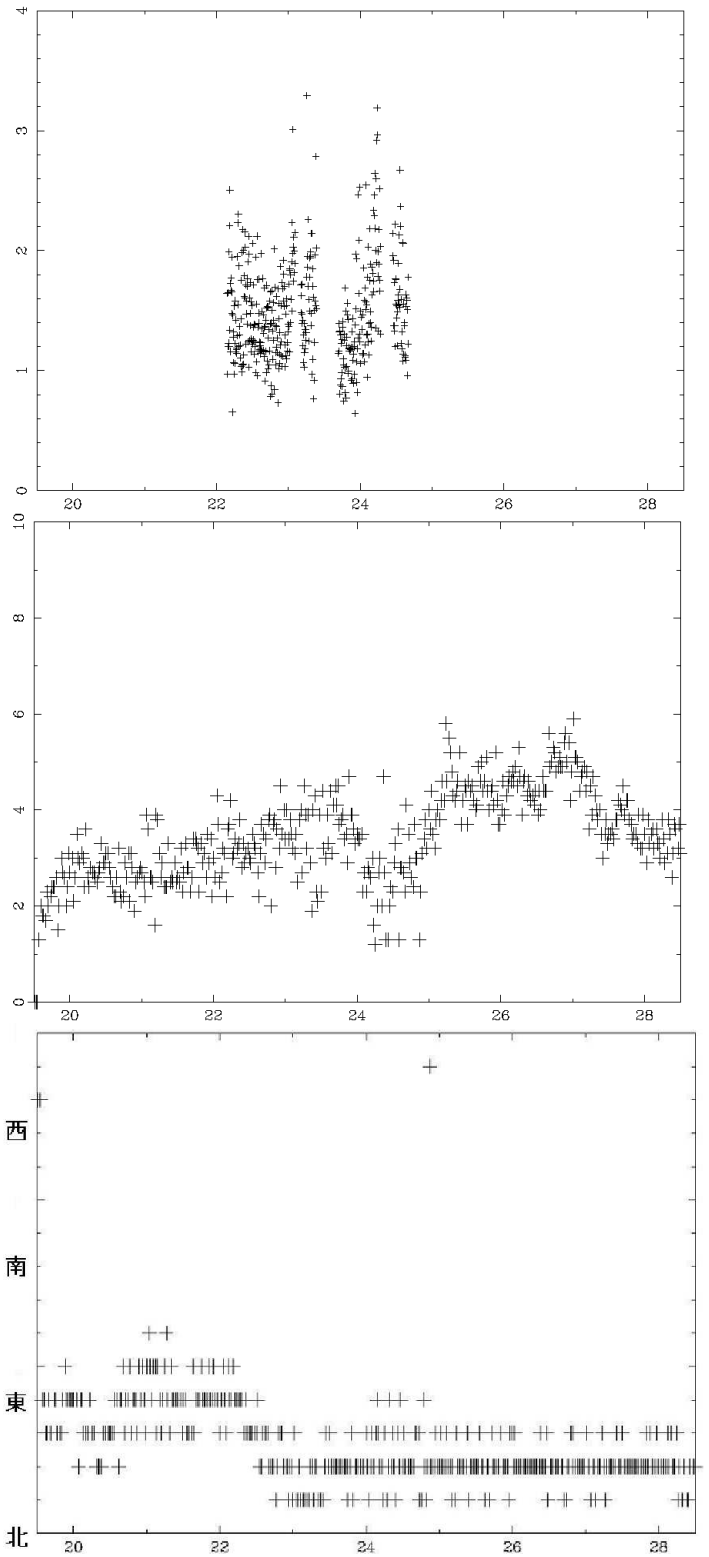

図 C.11: 2003 年 7 月 31 日のシーイング・風速・風向の時間変動

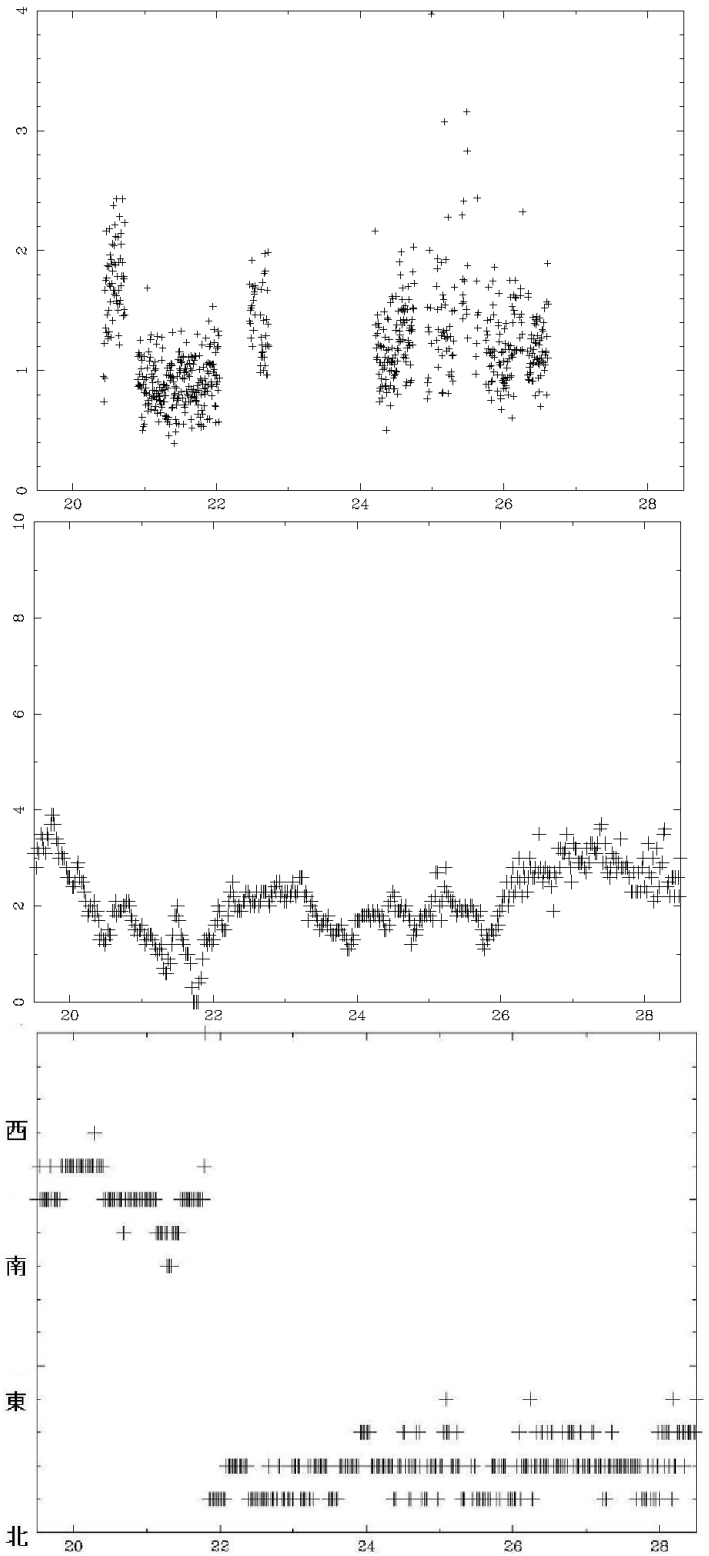

図 C.12: 2003 年 8 月 1 日のシーイング・風速・風向の時間変動

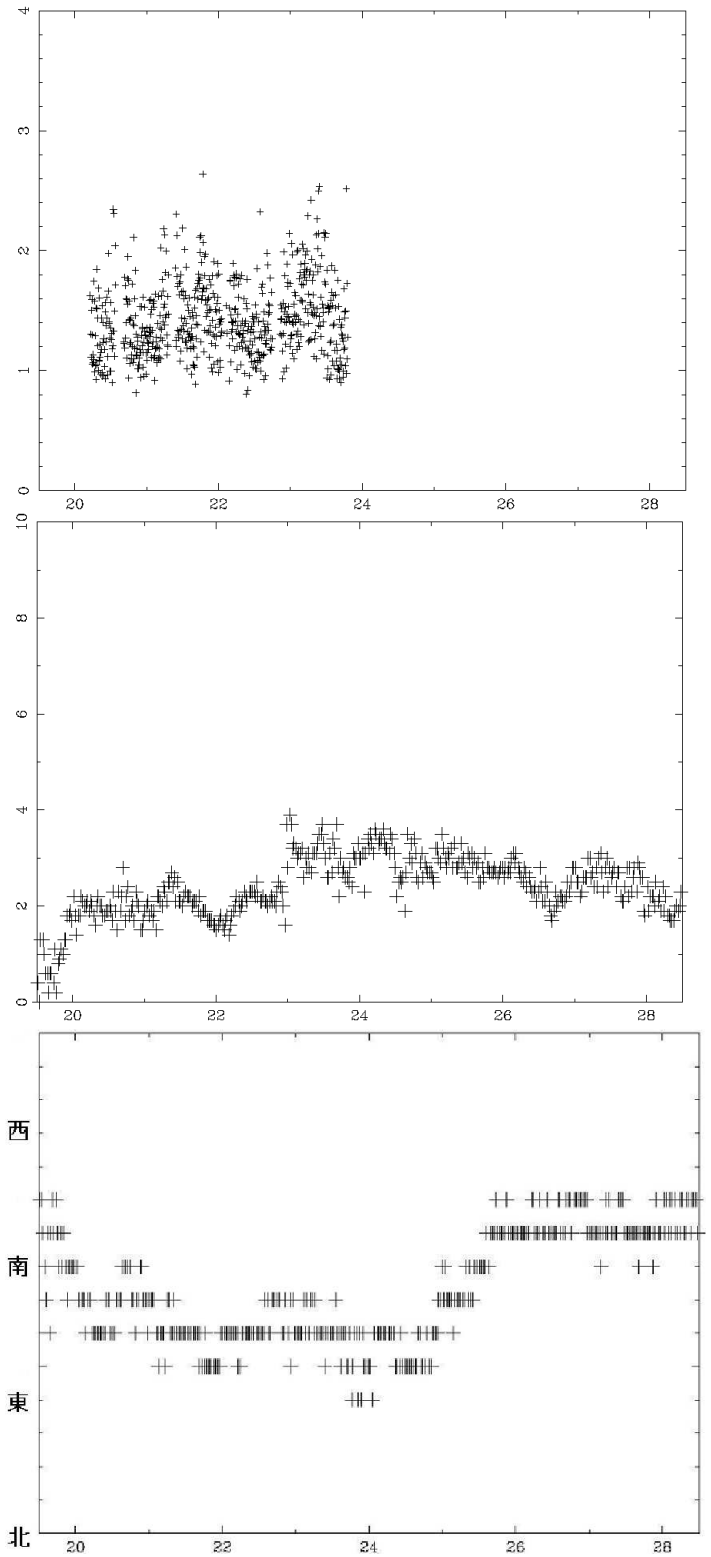

図 C.13: 2003 年 8 月 2 日のシーイング・風速・風向の時間変動

謝辞

本研究は、広島大学大学院理学研究科・大杉節教授の指導の下で行われました。大変興味深い研究テーマを与えて頂き、日々丁寧にご指導してくださった先生に心から感謝致します。また、すばらしい研究の場を与えて頂き、研究内容に関して日々熱心に議論してくださった同研究科・深沢助教授、宇宙科学センター・川端弘治助手に心から感謝致します。特に川端先生には、シーイング測定を手伝っていただいたり、天体観測についての基本的な知識を私が納得するまで懇切丁寧に指導して下さいました。私がこうして修士論文を無事に書き上げることができたのは、すべて川端先生の指導のおかげであると言っても過言ではありません。本当にありがとうございました。

岡山天体物理観測所で行ったシーイング測定では、岡山天体物理観測所の方々や京都大学新望遠鏡ワーキンググループの方々に並々ならぬご協力をして頂きました。本当にありがとうございました。

また、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。

最後になりましたが、大学院へと進学することを快く受け入れ、金銭的な面で全面的に援助してくれた両親に心から感謝します。

三年間、この高エネルギー宇宙・素粒子実験研究室で本当にたくさんのことを学びました。そのひとつひとつが、私にとって大きな誇りであります。この研究室で学んだことを生かして、これからは立派だと言われるような社会人になれるよう、日々努力していきたいと思います。

関連図書

[1] M.Sarazin and F.Roddier,The ESO differential image motion monitor,1989

[2] David B.Soules,James J.Drexler and Bret F.Draayer,Exposure-Time Effects on Differential r_0 Measurements,1996

[3] F.Roddier,Adaptive Optics in Astronomy,1999

[4] 188cm 望遠鏡ドーム内シーイングモニターについて, 浦口史寛,2001

[5] DIMM Target の選択, 柳澤顕史,2000

[6] 岡山シーイングモニタ計画, 柳澤顕史,1999

[7] F.Roddier,The Effect of Atmospheric Turbulence in Optical Astronomy

[8] Tatarski,Wave Propagation in a Turbulent Medium,1961

[9] 2001,2002,2003 年度岡山ユーザーズミーティング集録原稿

[10] Image motion as a measure of seeing quality,H.M.Martin,1987

[11] DIMM with large aperture separation and simultaneous seeing measurements at Mauna Kea,Fumihiro Uraguchi

[12] Trii,K.,et al., 2003,ApJ,597,L101

[13] Rapid UBVRI follow up of the highly collimated optical afterglow of GRB 010222,Krzysztof Z.Stanek,2001

[14] Black-Hole X-Ray Transients:The Effect of Irradiation on Time-Dependent Accretion Disk Structure,Soon-Wook KIM,1999

[15] Stock, J.&Keller,G..1960,Astronomical Seeing

[16] Miyashita et al.2001 年度すばるユーザーズミーティング集録,P14

[17] 流れ学, 谷一郎,1967

[18] 流れの物理, 高木隆司,1988

[19] Image quality at selected astronomical observatories-V3.0,2002

[20] Massey et al.ApJ,328,315,1988