

# MASS-DIMMによる名寄の 大気擾乱高度プロファイルの測定

北海道大学理学部地球科学科  
学籍番号 22100174

合田 周平  
(指導教官 渡部 重十 教授)

平成26年3月31日

## 要旨

北海道大学では、北海道名寄市に設置した北大 1.6m プリカ望遠鏡に搭載するための太陽系惑星観測用大気ゆらぎ補償光学系を開発している。本補償光学系では、広視野な補償光学システムである複数層共役補償光学系 (MCAO) もしくは地表面補償光学系 (GLAO) の構成を検討している。その検討・設計には大気擾乱高度プロファイルの情報が必要であり、そのため本研究では、MASS-DIMM(Multi-Aperture Scintillation Sensor with Differential Image Motion Monitor; Kornilov et al. 2007) による天文台上空の大気擾乱高度プロファイルの測定を行っている。

MASS は、サイズの異なる複数の開口を用いて 1 つの星のシンチレーションを測定することで、地表面付近を除く高度 0.5-16km までの大気擾乱高度プロファイルを得る。また DIMM は、1 つの星を 2 つの離れた開口を通して観測したときの 2 つの星像の相対的な重心揺らぎから大気擾乱の大きさ (シーイング) を測定する。MASS-DIMM はこの 2 つの装置から構成されており、1 つの明るい恒星光で同時測定を行う。DIMM で得られるシーイングは、大気擾乱の全ての高度に渡る積分値に相当し、これから MASS で得られた大気擾乱の大きさを減算することで、地表面から 16km 上空までの全ての高度の大気擾乱の大きさを求めることが可能である。

MASS-DIMM 装置本体は国立天文台が Cerro Tororo 天文台に依頼して製作したものを借用し、口径 28cm のシュミットカセグレン望遠鏡 Celestron C11 に搭載するための修正を行った。測定は 2013 年 9 月から 2014 年 02 月にかけて、ほぼ 1 か月おきに 7 日-10 日ほど行った。天頂付近の 0-1 等程度の明るさの恒星を通夜観測することで、夜毎の大気擾乱高度プロファイルとその時間変化を測定し、全 18 夜の測定に成功した。その結果、天文台上空の全大気揺らぎの 52% が地表面付近に、17% が高度 0.5km に、16% が高度 2km に集中していることが分かった。

## 目次

<b>1</b>	<b>イントロダクション</b>	<b>4</b>
1.1	本研究の目的	4
1.2	大気揺らぎ補償光学系	4
1.3	ピリカ望遠鏡	6
1.4	サイエンスケース	8
<b>2</b>	<b>MASS-DIMMによる大気擾乱の大きさの測定原理</b>	<b>10</b>
2.1	シーイングとシンチレーション	10
2.2	大気パラメータ	10
2.3	MASS	11
2.4	DIMM	17
2.5	MASS-DIMM	20
<b>3</b>	<b>ハードウェア</b>	<b>21</b>
3.1	MASSの光学系	21
3.2	DIMMの光学系	23
3.3	MASS-DIMMの光学系	24
3.4	アライメント	30
3.4.1	MASS光学系のアライメント	30
3.4.2	DIMM光学系のアライメント	30
3.4.3	ファブリーレンズのアライメント	32
3.4.4	システムの倍率係数	33
3.5	本測定での変更点	33
3.6	望遠鏡	34
3.7	赤道儀	35
3.8	CCDカメラ	36
3.8.1	読出しノイズ	37
3.8.2	ゲイン (A/D 変換係数)	38
3.8.3	ピクセルスケール	43
3.9	ソフトウェア	44
3.9.1	Turbina version 2.06	44
3.9.2	VimbaViewer version 1.2	44
3.9.3	ステラナビゲーター version 9	44
3.10	データ送信受信の流れ	44
3.11	DIMMのデータ処理	45
3.12	測定場所	46
<b>4</b>	<b>測定結果</b>	<b>47</b>
4.1	2013年09月17日	48
4.2	2013年09月18日	51

4.3	2013年09月19日	54
4.4	2013年09月20日	57
4.5	2013年09月21日	60
4.6	2013年09月22日	63
4.7	2013年10月16日	66
4.8	2013年10月17日	69
4.9	2013年10月18日	72
4.10	2013年10月19日	75
4.11	2013年10月21日	78
4.12	2013年10月22日	81
4.13	2013年10月23日	84
4.14	2013年11月05日	87
4.15	2013年11月11日	90
4.16	2013年11月13日	93
4.17	2013年11月15日	96
4.18	2013年12月16日	99
4.19	2014年02月04日	102
4.20	2014年02月05日	105
4.21	2014年02月07日	108
4.22	2014年02月08日	111
4.23	2014年02月12日	114
4.24	MASSデータの再処理	117
4.25	MASS-DIMM測定のみ	121
<b>5</b>	<b>まとめ・今後の課題</b>	<b>125</b>
<b>6</b>	<b>付録 A</b>	<b>126</b>

# 1 イントロダクション

## 1.1 本研究の目的

北海道大学では、北海道名寄市に設置した北大 1.6m ピリカ望遠鏡に搭載するための惑星観測用大気揺らぎ補償光学系を開発している。補償光学系とは、大気揺らぎによって乱れた天体の光の波面を、元の正しい波面に直すシステムである。従来の天文用補償光学系を使った惑星の観測では、観測対象の近傍に波面参照用の点源 (恒星、衛星) が必要となるため、限られた時期にしか観測を行うことができないが、本補償光学系では惑星本体を波面の参照光源とすることで、この問題を解消することを検討している。また従来型の補償光学系では、補正視野サイズが惑星視直径よりも狭い問題がある。そこで惑星サイズの視野 (50") を補償するために、広視野な補償光学系システムである地表面補償光学系 (GLAO)、もしくは複数層波面共役補償光学系 (MCAO) の構成を検討している。この検討のためには、名寄市上空の大気揺らぎの有効高度を調べる必要がある。そこで本研究では、MASS-DIMM (Multi-Aperture Scintillation Sensor with Differential Image Motion Monitor; Kornilov et al. 2007) を使って、天文台上空の大気揺らぎの高度分布を測定した。

## 1.2 大気揺らぎ補償光学系

補償光学系は、地球の大気揺らぎによる波面の乱れをリアルタイムで補正し、空間分解能の向上を実現するシステムである。この光学系は、波面センサ、可変形鏡、制御システムの3つの要素で主に成り立っている。波面センサは、波面の傾きや曲率を測定することができる。測定したデータは制御システムに送られ、波面センサで測定した波面の情報から可変形鏡に与える信号を計算する。そして大気揺らぎをキャンセルするような形に可変形鏡を変形させて、大気揺らぎの影響を補正する。この行程を大気揺らぎの時定数よりも早く行うことで、リアルタイムで大気揺らぎの影響を補正し続けることができる。

天文台の典型的なシーイングを 1.8"、大気揺らぎ層の有効高度を 1km と仮定すると、従来の天文用補償光学系の補正視野サイズは約 3.5" となる。これは惑星視直径よりも狭いので、従来型の補償光学系では惑星全体を補正することができない。この問題を解決するために、地表面補償光学系 (GLAO)、複数層波面共役補償光学系 (MCAO) という広視野な補償光学系システムが存在する。GLAO は、接地層の大気揺らぎのみを補正する補償光学系である。低い層での波面の乱れは広い角度範囲内で一定とみなせるので、非常に広い視野の補正が可能である。地表面や建物による摩擦で乱流が発生するため、大気揺らぎの大部分は地表面に集中している。よって接地層の揺らぎが強いサイトでは、この構成で十分な分解能の向上が期待できる。一方 MCAO は、複数の高度の大気揺らぎを分離して測定し、それぞれの高度に対応した複数の可変形鏡を使って広い視野での波面の補償を行う。よって複数の高度で大気揺らぎが大きい時に、このシステムの利用が期待できる。しかし可変形鏡を複数使うため、GLAO よりも装置が大規模になる可能性がある。

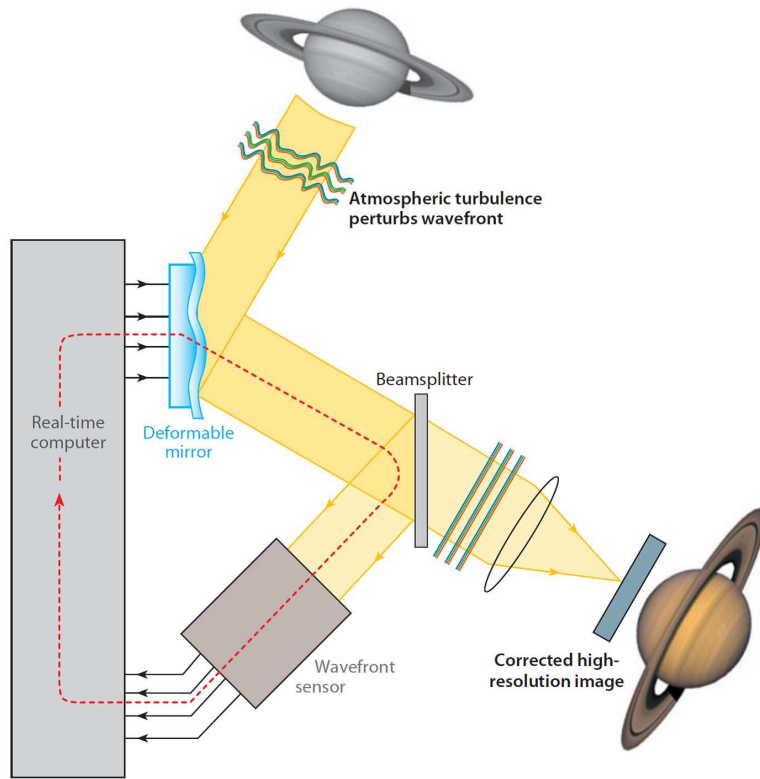


図 1.1: 補償光学系の概念図 [R. Davies and M. Kasper., 2012]

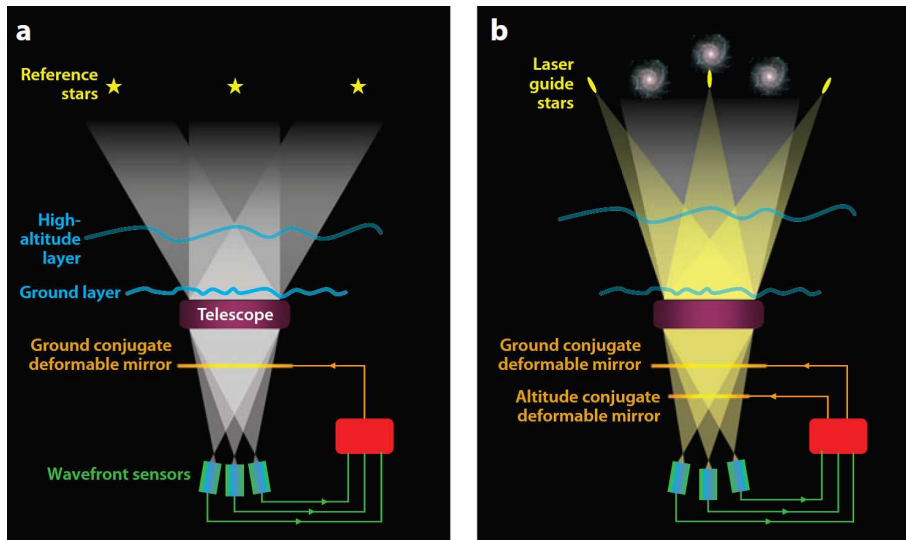


図 1.2: (左)GLAO の概念図 (右)MCAO の概念図 [R. Davies and M. Kasper., 2012]

### 1.3 ピリカ望遠鏡

ピリカ望遠鏡は、主鏡口径が 1.6m の可視/赤外望遠鏡である。主に惑星観測を目的とした望遠鏡であり、太陽系惑星観測用の光学望遠鏡としては世界最大級である。表 1.1 に望遠鏡の主な仕様を示す。

表 1.1: ピリカ望遠鏡の主な仕様

形式	リッチークレチアン
焦点モード	カセグレン焦点 1 つ、ナスミス焦点 2 つ
有効口径	1600 mm
合成焦点距離	19237.7 mm (F/12.0)

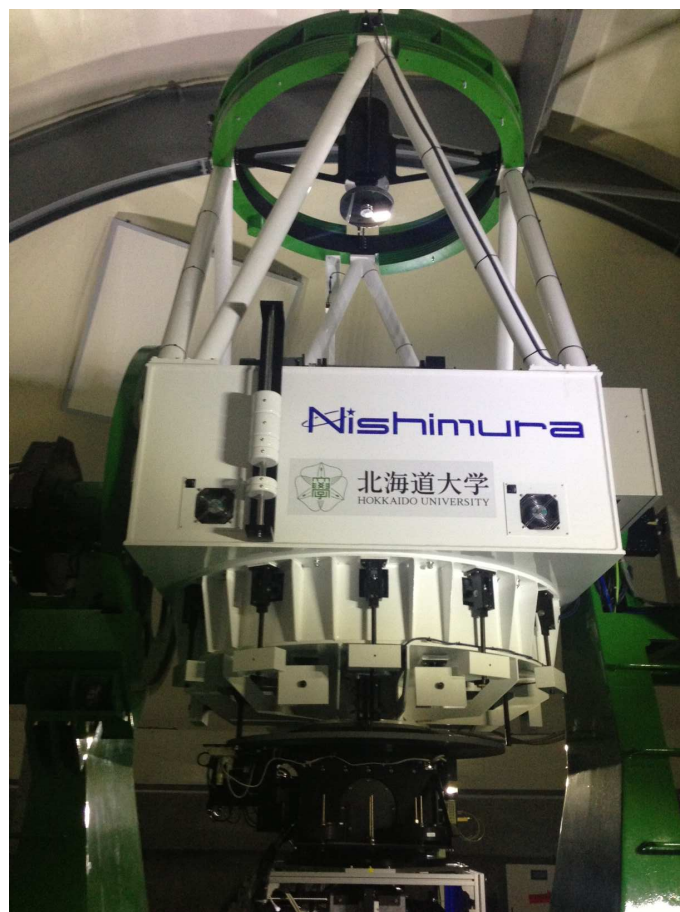


図 1.3: ピリカ望遠鏡

プリカ望遠鏡のカセグレン焦点には、北海道大学大学院理学研究院惑星宇宙グループによって開発されたスペクトル撮像装置、MSI(Mult-Spectral Imager)[Watanabe et al., 2012]が搭載されている。MSIの主な仕様を表 1.2 に記述する。MSIのカメラである C9200-13(浜松ホトニクス)は、EM-CCD(Electron Multiplying CCD : EM-CCD)を用いている。この CCD と液晶可変フィルター (Liquid Crystal Tunable Filter : LCTF) を用いることで、可視近赤線外波長域において多波長の狭帯域スペクトルイメージを短時間で効率よく撮像することができる。

表 1.2: MSI の主な仕様 [Watanabe et al.]

波長域	360–1050 nm
視野角	
–ノーマルモード	3.3'×3.3' (0.389"/pixel)
–高解像度モード	56'×56' (0.110"/pixel)
液晶可変フィルター	
–VIS	400–720 nm、 $\Delta\lambda \sim 10$ nm(@ 650 nm)
–SNIR	650–1100 nm、 $\Delta\lambda \sim 10$ nm(@ 900 nm)
狭帯域フィルター	360,365,370,380 ,390 nm ( $\Delta\lambda=10$ nm)
広帯域フィルター	B,V,Rc,lc
CCD カメラ	C9100-13 (浜松ホトニクス)
アレイサイズ	512×512 pixel
ピクセルサイズ	16×16 $\mu\text{m}$



## 1.4 サイエンスケース

北海道大学で開発中の惑星観測用大気揺らぎ補償光学系は、衝になった木星の視直径(約47")を補償できるほどの広い補正視野を持つ。このような広視野な補償光学系で期待されるサイエンスケースとして、木星大気の対流プロセスがある。

可視光で見る木星表面には、赤道に平行な数十の帯(バンド)が走っている。これらのバンドは赤道に平行な強い風によって区切られており、高いアルベドのバンドはゾーン、低いアルベドのバンドはベルトと呼ばれている。木星の南緯10°から南緯20°にあるベルトは南赤道ベルト(SEB)といい、可視波長でアルベドが変化する。このSEB全体でアルベドが高くなる現象はSEBFと呼ばれており、この時SEBは隣接しているゾーンと区別できないほど淡化する。SEBFは非常に短く、数か月後には急激に濃化して元のベルトに戻る現象(SEBD)が起きる。SEBは1-14年の間その状態を保ち、SEBFへは2-4か月で移行する。SEBFは1-3年持続するが、その後SEBDが起きて2-3か月でベルトが十分に発達する。SEBのアルベド変化の原因は、雲と上層ヘイズの構造や性質の変化が原因であると考えられているが、その周期性の可能性や各段階でのダイナミクスの原因などは明らかになっていない。

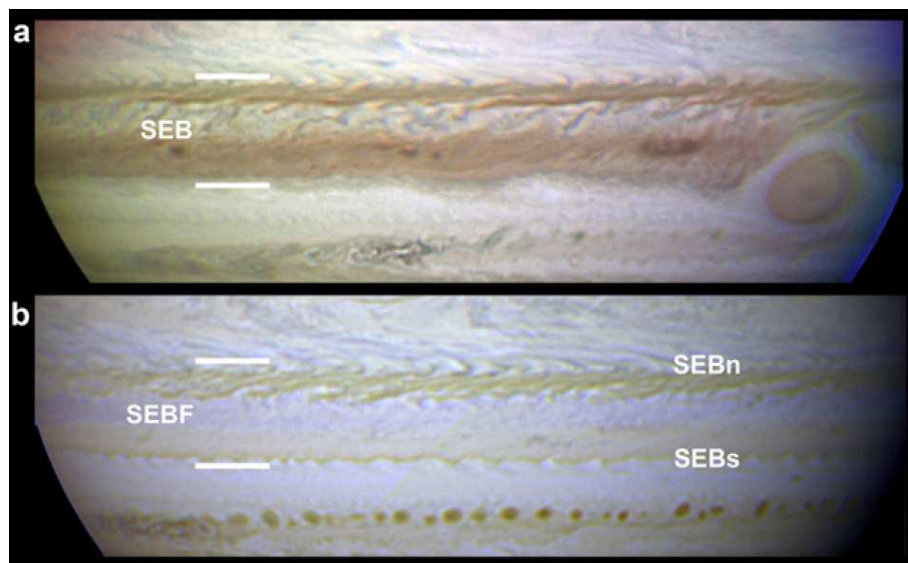


図 1.4: (a) アルベドの低いSEBがみられる。(B)完全にSEBFが発達した様子がみられる。SEBnとSEBsは、SEBF中でもアルベド変化が起こりにくい領域である。[Peres-Hoyos et al.]

最近では 2009 年 07 月から SEBF への発達が始まり、2009 年 11 月に SEBF への移行が完了したことが確認されている。その後約 1 年間 SEBF のままであり、2010 年 11 月から SEBD が起きた。この時ハッブル宇宙望遠鏡を使った SEBF の観測が先行研究で行われている。[Peres-Hoyos et al., 2011] この観測では、 $\sim 225\text{nm}$ 、 $\sim 350\text{nm}$ 、 $\sim 500\text{nm}$ 、 $\sim 600\text{nm}$ 、 $\sim 890\text{nm}$  の波長帯を使い、木星の異なる高度を見ている。図 1.4 は  $\sim 225\text{nm}$  と  $\sim 350\text{nm}$  の波長域で観測した結果である。 $\sim 350\text{nm}$  の波長域は、他の波長域の観測結果と比べると非常に大きなアルベドの変化が見られる。しかし 2010 年 04 月から木星は合になり、完全に SEBF に発達するまでの詳細な変化は確認できなかった。もし SEBF に発達するまでのアルベド変化を、多波長で時間分解能の高いモニタリング観測を行うことができれば、SEBF への移行期間での鉛直方向の風速を求めることができる。SEBF の各段階での鉛直方向の粒子の動きを明らかにすることは、木星の対流プロセスの理解を深めるステップとなる。

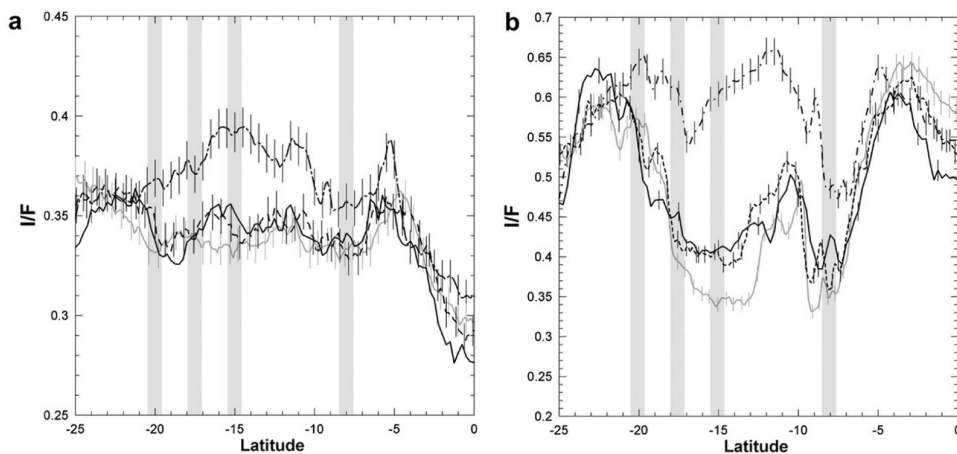


図 1.5: (a) $\sim 225\text{nm}$  のアルベド変化 (b) $\sim 350\text{nm}$  のアルベド変化 (縦軸:アルベド、横軸:木星緯度)[Peres-Hoyos et al.]

天文台での典型的なシーイング値は約  $1.8''$  (@  $650\text{nm}$ ) である。これは木星の緯度方向に換算すると約  $4.3^\circ$  である。しかし SEB の範囲は約  $10^\circ$  なので、現状では十分な空間分解能を得ることができない。そこで補償光学系で空間分解能を、木星の水平距離の  $1200\text{km}$  に相当する  $0.4''$  まで向上させることで、SEB の観測に十分な解像度を期待できる。

## 2 MASS-DIMMによる大気擾乱の大きさの測定原理

### 2.1 シーイングとシンチレーション

地上望遠鏡で観測を行うと、観測天体の星像がぼやける。それは大気揺らぎにより天体からの光の波面が乱れてしまうからである。この星像のぼやけを定量化したものがシーイングであり、星像の輝度分布のFWHM [arcsec]で表す。このシーイングは、Fried parameter( $r_0$ )というパラメータに置き換えることができる。Fried parameterは、波面が平面であるとみなせる空間のサイズであり、大気のシーイング( $\epsilon_0$ )は $r_0$ と $\lambda$ の比で表すことができる。

$$\epsilon_0 = 0.98 \frac{\lambda}{r_0} \quad (2.1)$$

望遠鏡の理想的な角度分解能は、観測波長 $\lambda$ と望遠鏡の口径 $D$ の比 $\sim \frac{\lambda}{D}$ で表すことができる。望遠鏡の口径を大きくすれば分解能が高くなるが、実際は $r_0$ のサイズで口径 $D$ は頭打ちとなり、シーイングほどの分解能しか得ることができない。

シンチレーションとは、大気揺らぎが短時間で変化することによって起こる、ある空間内の天体の光量の変化である。一般的には、星がまたたいて見えることを指す。

### 2.2 大気パラメータ

特定の大気層での乱流強度は、 $C_n^2$ (屈折率構造関数)で表される。 $C_n^2$ の単位は $\text{m}^{-2/3}$ である。この乱流強度は季節、月、さらには分単位で大きさが変化する。ジェット気流が起こる高度( $\sim 10\text{km}$ )よりも高い高度では、乱流強度が小さくなり $10^{-18}\text{m}^{-2/3}$ だといわれている。 $C_n^2$ を使って、次の式を定義する。

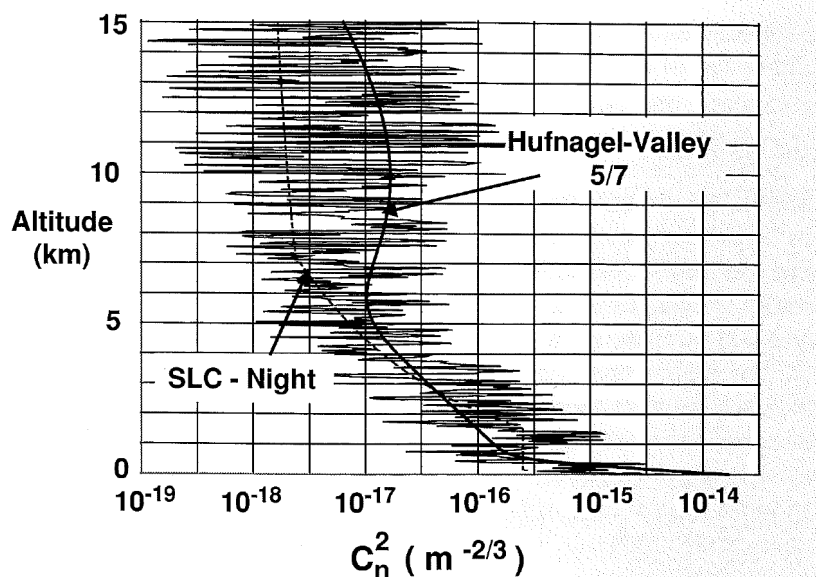


図 2.1:  $C_n^2$  プロファイル (縦軸: 高度 [km]、横軸:  $C_n^2 [\text{m}^{-2/3}]$ ) [K. Robert., 2000]

$$J = \int_{path} C_n^2(z) dz \quad (2.2)$$

path は、観測天体の光が通過した大気の伝播経路である。シーイング (星像の大きさ) は  $J$  で表すことができる。

$$r_0^{-5/3} = 0.423 \left( \frac{2\pi^2}{\lambda} J \right) \quad (2.3)$$

### 2.3 MASS

補償光学系システムの性能を見積もるためには、サイトの高度ごとの大気揺らぎの情報が必要である。特にリアルタイムな大気パラメータは、システムをより効果的にする。大気揺らぎを測定する方法としては、気球を使った調査や SCIDAR などがある。SCIDAR とは口径が 1 m 以上の望遠鏡を使用して、2 重星を観測して大気揺らぎを測定する方法である。これらの方法は高度分解能の高い測定を行うことができるが、観測条件に制限がかかるので、気球や SCIDAR は時間分解能の高い測定を行うことが難しい。そこでリアルタイムで大気揺らぎの測定を行う装置が、V.Kornilov et al. 2003 によって開発された。この開発された MASS は相対的な天体のシンチレーションの変化から、大気揺らぎを測定する装置である。鉛直方向の分解能は SCIDAR と比べると非常に小さいが、明るい 1 つの恒星を使うことでモニタリング観測が可能となる。図 2.2 のように、MASS は大気揺らぎの高度に応じて、シンチレーションの空間スケールが大きくなることを利用している。以下では、異なるアパーチャーを使ったシンチレーション理論を説明する。

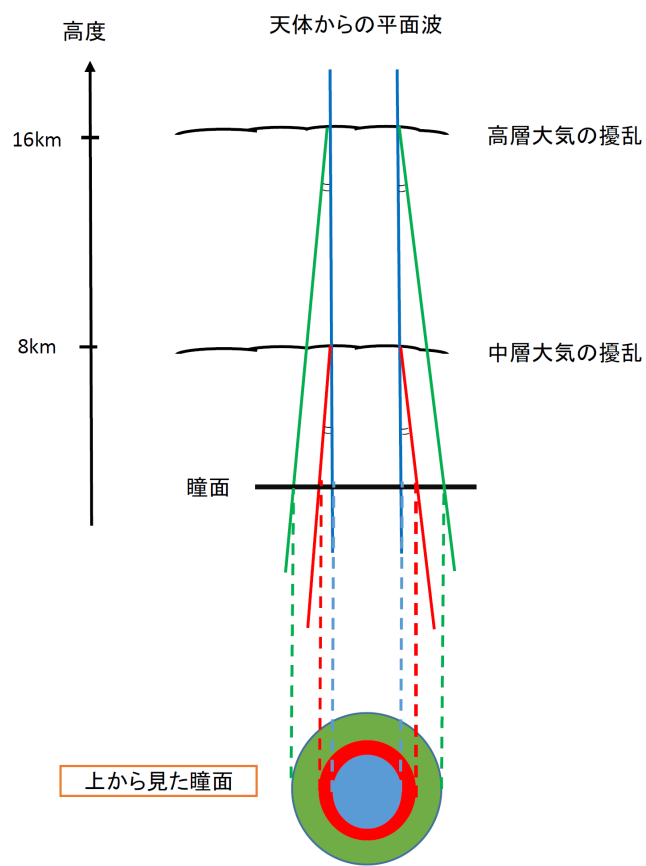


図 2.2: 大気揺らぎの高さによる空間スケールの変化

乱流媒質の標準的な波面の伝播理論は、弱い摂動近似 (Rytov 近似) に基づいている。波の相対振幅を  $\chi$  とすると、望遠鏡の瞳内の光強度  $I$  の分布は、次のように表すことができる。

$$I = I_0 \exp(2\chi) \quad (2.4)$$

Rytov 近似は  $\chi \ll 1$  の時に有効である。光強度の自然対数の分散であるシンチレーション指数は次のように与えられる。

$$\sigma_I^2 \approx \langle (\ln I - \langle \ln I \rangle)^2 \rangle \quad (2.5)$$

この強度分散 (シンチレーション指数) は、屈折率構造関数  $C_n^2$  と重み関数  $Q$  の積を高度で積分した式と等しい。次の式では、天頂角  $\gamma$  での測定を考慮するために、高度  $h$  の代わりに  $z = h \sec \gamma$  としている。

$$\sigma_I^2 = \int_0^{Z_{max}} dz Q(z) C_n^2(z) \quad (2.6)$$

積分は望遠鏡の開口 ( $z=0$ ) から、乱流層までの最大距離  $Z_{max}$  の範囲で実行される。重み関数  $Q$  は乱流スペクトルとフレネル回折の2つの項の積を、空間周波数で積分したものである。

$$Q(z) = 9.62 \lambda^{-2} \int_0^\infty df f^{-8/3} \sin^2(\pi \lambda z f^2) A(f) \quad (2.7)$$

式2.7の  $A(f)$  はアパーチャーフィルターである。 $W(x,y)$  をアパーチャーの透過関数、 $\widetilde{W}(x,y)$  を  $W(x,y)$  のフーリエ変換をした形とする。 $\widetilde{W}(x,y) = 0$  になるよう正規化し、空間周波数面  $f = (f_x, f_y)$  を極座標に直す。その結果  $A(f)$  の一般式は次式で表される。

$$A(f) = (2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} d\phi |\widetilde{W}(f, \phi)|^2 \quad (2.8)$$

次にシンチレーションを、2つのアパーチャー  $W_1$ 、 $W_2$  で同時に観測したとする。差分シンチレーション指数  $\sigma_d^2$  は、2つのフラックスの比の自然対数の分散として定義される。

$$\sigma_d^2 = \langle (\ln \frac{I_1}{I_2} - \langle \ln \frac{I_1}{I_2} \rangle)^2 \rangle \quad (2.9)$$

式2.9に式2.4を代入することで、 $\sigma_d^2 = 4 \langle (\chi_1 - \chi_2)^2 \rangle$  を求めることができる。 $\chi_1(x) - \chi_2(x)$  のフーリエ変換は、アパーチャーフィルターのみが異なるフーリエ変換の差分として計算される。よって  $\widetilde{W}(f_x, f_y)$  は  $\widetilde{W}_1(f_x, f_y) - \widetilde{W}_2(f_x, f_y)$  の差として表すことができる。2つのアパーチャー  $W_1$ 、 $W_2$  で同時に観測した時のアパーチャーフィルターは次のようになる。

$$A_d(f) = (2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} d\phi |\widetilde{W}_1(f, \phi) - \widetilde{W}_2(f, \phi)|^2 \quad (2.10)$$

2つのアパーチャーの形状を、同心円で環状のアパーチャーとする (図 2.3)。d を外円の直径、 $\varepsilon d$  を内円の直径とすると、アパーチャーフィルター  $A_d(f)$  は次のように表される。

$$\widetilde{W}_1(f) = \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left[ \frac{2J_1(\pi df)}{\pi df} - \varepsilon^2 \frac{2J_1(\pi df)}{\pi df} \right]^2 \quad (2.11)$$

$$\widetilde{W}_2(f) = \frac{2J_1(\varepsilon \pi df)}{\varepsilon \pi df} \quad (2.12)$$

$$A_d(f) = (1 - \varepsilon^2)^2 \left[ \frac{2J_1(\pi df)}{\pi df} - \varepsilon^2 \frac{2J_1(\varepsilon \pi df)}{\varepsilon \pi df} \right]^2 \quad (2.13)$$

ここで  $J_1$  はベッセル関数である。図 2.3 を見ると、ある高度で重み関数が定常になっていることがわかる。これは図 2.4 の通り、重み関数は高度が変化しても大きく変化するの  
は低周波成分のみだからである。アパーチャフィルターがバンドパスフィルターの形を取っており、これはシンチレーションの空間スケールであるフレネル半径  $\sqrt{\lambda z}$  と同程度である。例えば  $\lambda=500\text{nm}, z=1\text{km}$  の時フレネル半径は 2.2cm であり、図 2.3 では  $d=4\text{cm}$  の重み関数が  $z=1\text{km}$  から定数になっていることがわかる。つまり異なる直径のアパーチャーの組み合わせでそれぞれの強度の相関を取ることで、揺らぎの高度を識別することができる [A.Tokovinin., 2002]。

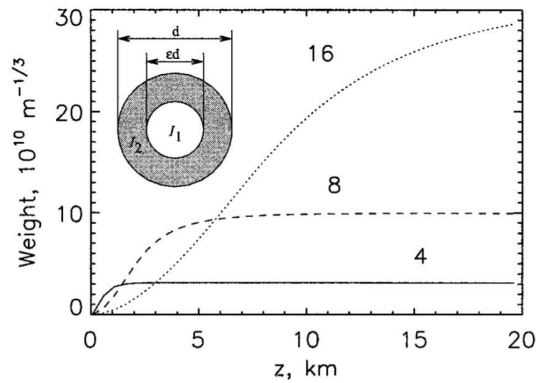


図 2.3: 同心円アパーチャーの時の差分シンチレーション指数の重み関数。  $\varepsilon=0.5d$ 、  $\lambda=500\text{nm}$ 。(縦軸:重み関数 [ $10^{10}m^{-1/3}$ ]、横軸:高度 [km]) 実線: $d=4\text{cm}$ 、破線: $d=8\text{cm}$ 、点線: $d=16\text{cm}$  [A.Tokovinin., 2002]

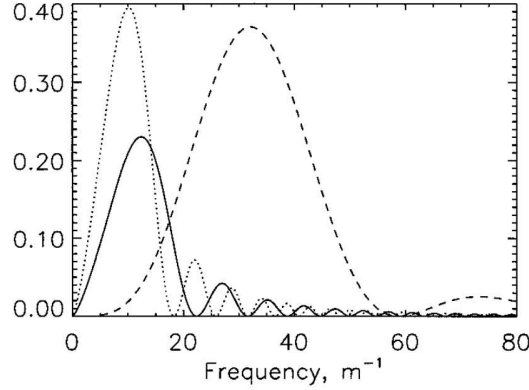


図 2.4: 差分シンチレーション指数の重み関数は 3 つの項の積分で成り立っている。パワースペクトルの項  $f^{8/3}$ 、フレネルファクターの項  $\sin^2(\pi\lambda z f^2)$ 、アパーチャーフィルター  $A(f)$  実線: $f^{8/3}$  と  $\sin^2(\pi\lambda z f^2)$  の積 ( $z=4\text{km}$ ) 点線: $f^{8/3}$  と  $\sin^2(\pi\lambda z f^2)$  の積 ( $z=6\text{km}$ ) 破線: $4\text{cm}$  と  $2\text{cm}$  のアパーチャーフィルター  $A_d(f)$  [A.Tokovinin., 2002]

次に実際に使用する MASS の原理について理論的に説明する。乱流理論では式 2.5 のように、シンチレーション指数は対数の分散式で表されるが、実際の測定では測定されたカウント値が 0 であったり、定常な光でさえもカウント値が変動するので、MASS の計算で実際に使用するシンチレーション指数は次の式で表される。

$$s_A^2 = \langle \Delta I_A^2 \rangle / \langle I_A \rangle^2 \quad (2.14)$$

$I_A$  はアパーチャー A を通して受け取った瞬間的な光量であり、 $\Delta I_A$  は  $I_A$  の変化量である。また、差分シンチレーション指数も次のように表される。

$$s_{AB}^2 = \langle \left( \frac{\Delta I_A}{\langle I_A \rangle} - \frac{\Delta I_B}{\langle I_B \rangle} \right)^2 \rangle \quad (2.15)$$

$s_A^2$  と  $s_{AB}^2$  は、 $C_n^2(z)$  と相関性があるので

$$s_k^2 = \int W_k(z) C_n^2(z) dz \quad (2.16)$$

と表す。 $k$  はアパーチャー、または 2 つのアパーチャーの組み合わせを示す。(2.16) 式の重み関数  $W_k(z)$  は、 $k$  ごとの高度反応を表している。弱いコルモゴロフ乱流では、重み関数はアパーチャーの形状や測定された光のスペクトルのみに依存する。アパーチャーが  $D_A$  と  $D_B$  の差分シンチレーション指数は、 $1/D_B < |f| < 1/D_A$  のシンチレーションのバンドパス空間フィルターの役割をしている一方で、アパーチャー  $D_A$  のシンチレーション指数は  $|f| < 1/D_A$  のシンチレーションのローパスフィルターの役割をしている。従って、円形のアパーチャーを使った MASS は、コルモゴロフ乱流の中間スケールに感度がある。

2 つの異なるアパーチャーの差分シンチレーション指数では、内側のアパーチャーがフレネル半径である  $\sqrt{\lambda z}$  よりも大きくなる時、重み関数は伝搬距離  $z > z_{AB} = D_{AB}^2 / \lambda$  で



ほとんど依存しない ( $D_{AB} = (D_A + D_B/2)$ )。これは測定された差分シンチレーション指数から直接乱流積分を求めることを意味する。その一方でシンチレーション指数では、重み関数は小さい伝搬距離 ( $z \ll D^2/\lambda$ ) の時は  $z^{5/6}$  に、大きい伝搬距離 ( $z \gg D^2/\lambda$ ) では  $z^2$  に比例する。通常のシンチレーション指数では高い高度の弱い乱流と、低い高度の強い乱流を区別することができないので、差分シンチレーション指数を使うことで高度ごとに区別することができる。

MASS には 4 つのアーチャーがあるので、計 10 個の  $s_k$  を測定する。この測定した  $s_k$  と 0.5、1、2、4、8、16km の 6 つの層に合わせた乱流層モデルでフィッティングをすることで、高度ごとの  $C_n^2$  を計算する。次の式は、乱流プロファイルの基本となる式である。

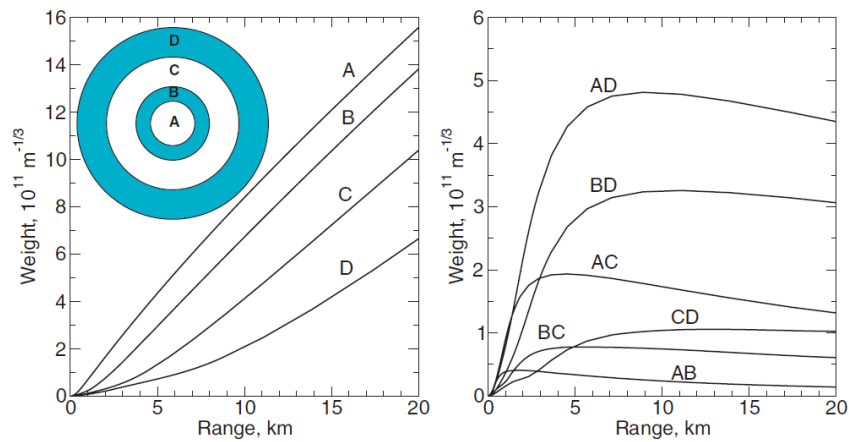


図 2.5: 左)4 つのアーチャー A、B、C、D の重み関数  $W_k(z)$ 。アーチャー A、B、C、D の直径はそれぞれ 1.9、3.2、5.6、8cm である。(右)4 つのアーチャーの差分の重み関数  $W_k(z)$ 。[V.Kornilov et al., 2007]

$$\mathbf{s} = \mathbf{WJ} \quad (2.17)$$

$$J_i = \int_{ithlayer} C_n^2(h_i) dh \quad (2.18)$$

$\mathbf{s}$  はシンチレーション指数のベクトルである。また  $\mathbf{W}$  は  $10 \times 6$  の重み行列で、 $\mathbf{J}$  は乱流プロファイルの 6 つの要素で成り立っているベクトルである。 $h_i$  は順に、0.5、1、2、4、8、16km である。[V.Kornilov et al., 2007]

## 2.4 DIMM

標準的な DIMM は、2つの離れた開口で1つの星から得られる2つの星像を観測する。そして2つの星像の相対的な重心揺らぎから、シーイングに換算することができる。ここで2つの開口の口径間方向に平行な方向を Longitudinal 方向、それに直行する方向を Transverse 方向として、シーイングはこの2つの方向ごとに求める (図 2.6)。像の相対揺らぎからシーイングを計算しているため、望遠鏡のトラッキングエラーや風などによるブレに対する感度が非常に小さい。よって非常に実用的なシーイングモニターであると言える。

以下では、DIMM で得られる2つの星像の相対揺らぎとシーイングの関係式を理論的に

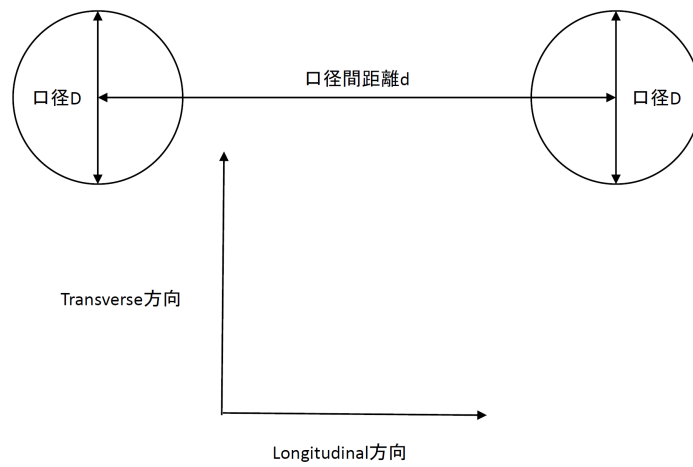


図 2.6: DIMM の概略図

説明する。

天体から放射された光線は地球に届くまでは平面波である。しかし地球大気を通過すると、大気の擾乱の影響を受けて波面が乱れてしまう。この波面の波形を  $z(x,y)$  とすると、波面位相誤差  $\phi(x,y)$  を使って次の関係式を表すことができる。

$$z(x,y) = \frac{\lambda}{2\pi} \phi(x,y) \quad (2.19)$$

光線の進む方向と波面は垂直なので、x 方向の到達角度の変動を  $\alpha$  とおくと、

$$\alpha(x,y) = -\frac{\partial}{\partial x} z(x,y) = -\frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \phi(x,y) \quad (2.20)$$

となる。よって  $\alpha$  の共分散は以下のように定義できる。

$$B_\alpha(\xi,\eta) = \langle \alpha(x,y), \alpha(x+\xi, y+\eta) \rangle \quad (2.21)$$

$(\xi,\eta)$  は  $(x,y)$  からのずれ量である。また位相誤差の共分散  $B_\phi(\xi,\eta)$  も定義する。

$$B_\phi(\xi,\eta) = \langle \phi(x,y), \phi(x+\xi, y+\eta) \rangle \quad (2.22)$$

(2.21) 式と (2.22) 式から、次の関係式を導出することができる。

$$B_\alpha(\xi, \eta) = -\frac{\lambda^2}{4\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} B_\phi(\xi, \eta) \quad (2.23)$$

ここで位相構造関数  $D_\phi(\mathbf{r})$  を導入する。位相構造関数  $D_\phi(\mathbf{r})$  は、大気の擾乱で凸凹になった波面の構造を定量的に表す物理量であり、以下のように定義されている。

$$D_\phi = \langle |\phi(\mathbf{x} + \mathbf{r}) - \phi(\mathbf{x})|^2 \rangle \quad (2.24)$$

$\phi(\mathbf{x})$  は  $x$  での位相のずれ量である。これは、望遠鏡の開口面上で距離  $r$  離れた 2 点の位相の差の 2 乗平均となっている。 $\mathbf{r} = (\xi, \eta)$  で表した  $D_\phi(\xi, \eta)$  は、共分散の式を用いて以下

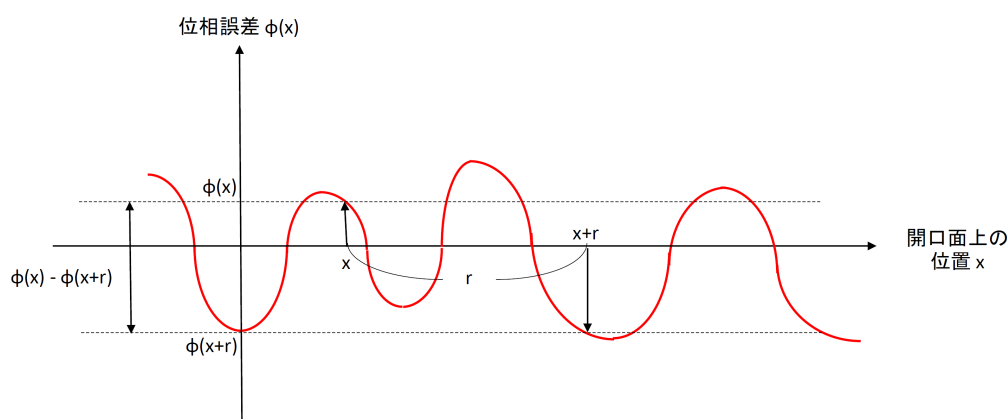


図 2.7: 波面の位相差

のように表すことができる。

$$D_\phi(\xi, \eta) = 2[B_\phi(0, 0) - B_\phi(\xi, \eta)] \quad (2.25)$$

これに (2.23) 式を代入して

$$B_\alpha(\xi, \eta) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} D_\phi(\xi, \eta) \quad (2.26)$$

となる。Kolmogorov 乱流理論の局所的等方性の仮定により、位相構造関数  $D_\phi(\xi, \eta)$  は次のように与えられる。

$$D_\phi(\xi, \eta) = 6.88 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{5/3} \quad (2.27)$$

ここで  $r = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$  であり、 $r_0$  は Fried parameter である。(2.27) 式を (2.26) 式を代入すると、

$$\begin{aligned} B_\alpha(\xi, \eta) &= 0.087 \lambda^2 r_0^{-5/3} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} [\xi^2 + \eta^2]^{5/6} \\ &= 0.145 \lambda^2 r_0^{-5/3} [(\xi^2 + \eta^2)^{-1/6} - \frac{1}{3} \xi^2 (\xi^2 + \eta^2)^{-7/6}] \end{aligned} \quad (2.28)$$

$\eta = 0$  とすると、Longitudinal 方向の共分散の式は、 $\xi = d$  の関数として以下の式で表される。

$$B_l(d) = B_\alpha(d, 0) = 0.097 \left(\frac{\lambda}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{\lambda}{d}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.29)$$

$\xi = 0$  とすると、Transverse 方向の共分散の式は、 $\eta = d$  の関数として以下の式で表される。

$$B_t(d) = B_\alpha(0, d) = 0.145 \left(\frac{\lambda}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{\lambda}{d}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.30)$$

このように Transverse 方向の共分散は、Longitudinal 方向の共分散より約 1.5 倍大きい値となる。またどちらも口径間距離  $d$  の  $-1/3$  乗で減衰する。これは Borgnino et al. (1978) によって実験的に確かめられている。これらの式に従うと、口径間距離  $d$  を 0 に近づけると  $B_\alpha$  が発散してしまうことになる。しかし実際  $d = 0$  での値は、開口の平均で制限されるので発散はしない。 $d = 0$  での値は Fried(1965, 1975) と Tatarski (1971) によって次のように与えられる。

$$B_l(0) = B_t(0) = B_\alpha(0, 0) = 0.179 \left(\frac{\lambda}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{\lambda}{D}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.31)$$

$D$  は望遠鏡の口径である。

以上のことから、測定された星像重心の相対的な揺らぎの分散は以下の式で表される。

$$\sigma_l^2(d) = 2[B_l(0) - B_l(d)] \quad (2.32)$$

$$\sigma_t^2(d) = 2[B_t(0) - B_t(d)] \quad (2.33)$$

$d \geq D$  の時、Longitudinal 方向の分散  $\sigma_l^2(d)$  は

$$\sigma_l^2(d) = 2\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} [0.179D^{-\frac{1}{3}} - 0.0968d^{-\frac{1}{3}}] \quad (2.34)$$

$d \geq D$  の時、Transverse 方向の分散  $\sigma_t^2(d)$  は

$$\sigma_t^2(d) = 2\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} [0.179D^{-\frac{1}{3}} - 0.145d^{-\frac{1}{3}}] \quad (2.35)$$

以上 (2.34) 式と (2.35) 式から、Longitudinal、Transverse 方向それぞれの Fried parameter  $r_0$  が求まる。[M.Sarazin and F. Roddier., 1990]

しかし実際に DIMM で測定されるのは、重心ではなく波面の RMS が最小である位置、Z-tilt (Zernike tilt) である。重心と Z-tilt の誤差は小さいが、無視することはできない。よって Z-tilt を考慮して  $r_0$  の計算を行う必要がある。Conan et al. (2000) によって次の式が求められた。

$$\sigma_l^2(d) = 0.340\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} [D^{-\frac{1}{3}} - 0.570d^{-\frac{1}{3}} - 0.040d^{-\frac{7}{3}}] \quad (2.36)$$

$$\sigma_t^2(d) = 0.340\lambda^2 r_0^{-\frac{5}{3}} [D^{-\frac{1}{3}} - 0.855d^{-\frac{1}{3}} - 0.030d^{-\frac{7}{3}}] \quad (2.37)$$

観測対象の天体の高度が低くなるほど、天体からの光がより多くの大気の擾乱の影響を受けるため、FWHMの値が大きくなる。このため大気揺らぎの大きさを示す指標としてシーイングを求める場合は、常に天頂に観測天体があると仮定して、天頂角補正を行う。

$$\epsilon'_0 = (\cos\gamma)^{-3/5} \epsilon_0 \quad (2.38)$$

$\gamma$  は天頂角である。以上の式を用いることで、DIMMで得た星像の重心揺らぎ ( $\sigma_l^2, \sigma_t^2$ ) から、シーイングを求めることができる。

## 2.5 MASS-DIMM

MASS-DIMMはV.Kornilov氏らによって開発された装置である(図2.8)。近年では、多くの望遠鏡プロジェクトのサイトテストや補償光学系の性能の見積もりのために使用されている。MASSは高度0.5kmから16kmの擾乱の影響を受けたシーイングを測定し、またDIMMが測定したシーイングは天体の光が通過する全大気の擾乱の積分値である。よって(2.2)式を使って、高度0.5kmまでの接地層(Ground-Layer)の擾乱強度を求めることができる。

$$J_{GL} = J_{DIMM} - J_{MASS} \quad (2.39)$$

また式2.39の式を使い、DIMMシーイングとMASSシーイングから直接GLシーイングを測定することができる。

$$\epsilon_{GL} = (\epsilon_{DIMM}^{5/3} - \epsilon_{MASS}^{5/3})^{3/5} \quad (2.40)$$

減算を高い精度で行うためには、MASSとDIMMで測定する光が同じ大気を通過する必要がある。従って同じ光路を使うために、2つの装置を合体して使用する。このように低い乱流層の擾乱も求めることができるので、MASS-DIMMの優位性は明らかである。



図 2.8: MASS-DIMM の外観

### 3 ハードウェア

MASS-DIMMでは、焦点距離が2800-3000mmの望遠鏡の使用が推奨されている。今回は名寄市から Celestron C11 と、この望遠鏡を搭載可能な赤道儀である高橋製作所 EM-200 Temma2 を借用した。また DIMM の測定に必要な CCD カメラは、国立天文台から AVT 社の Prosilica GE-680 を借用して使用している。本章では、測定に使用するハードウェアとソフトウェアの詳細について述べる。

#### 3.1 MASS の光学系

MASS の光学配置は図 3.1 に示されている。望遠鏡の開口から入ってきた天体の光は、ファブリーレンズ (FL) と焦点アパーチャー (FA) と通過して、射出瞳面に導入している Segment mirror (PSU) というミラーに反射する。PSU は 4 つの同心円状のアパーチャーが、4 方向にそれぞれ傾いている環状のミラーシステムである (図 3.2)。それぞれのアパーチャーの名称は小さい方から A、B、C、D としている。PSU で 4 方向に分割された光線は RA-RD で再反射し、対応した光電子増倍管 (PMT) A-D に入射する。PSU のそれぞれのアパーチャーは、互いに対して約  $8^\circ$  傾いている。よって RA から RD までは約  $30^\circ$  の傾きがある。

MASS のアパーチャー A-D の入射瞳像の大きさは、望遠鏡とレンズシステムの光学倍率係数  $k$  に依存する。例えば口径 28cm、F/10 の望遠鏡と焦点距離-100mm、+75mm のファブリーレンズシステムでは、倍率係数  $k = 16.0$  となる。この時の MASS の PSU の直径とそれに対応する入射瞳像の大きさを表 3.1 に記載する。 $k$  はファブリーレンズの焦点距離を変えることで、その光学系に適した数値に調整することができる。

表 3.1: PSU の直径、射出瞳像の直径

Aperture	PSU の直径 [mm]	入射瞳像の直径 [mm]
A	1.27	20.3
B	2.16	34.6
C	3.86	61.8
D	5.41	86.6

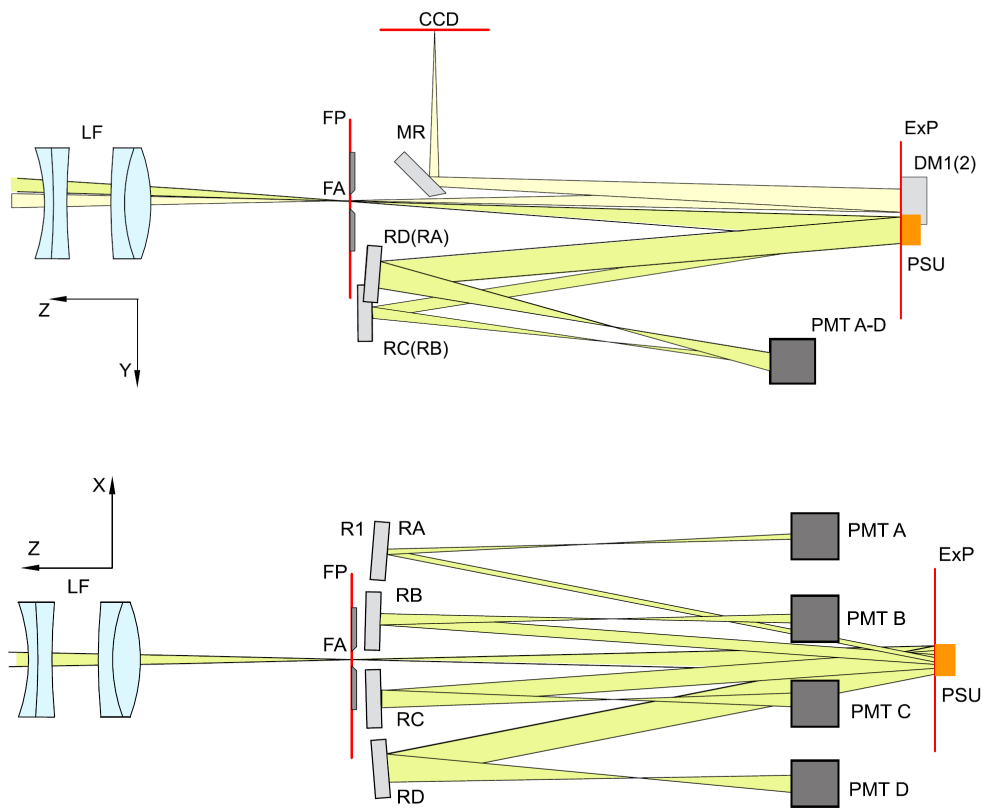


図 3.1: (上)MASS-DIMM を横から見た時の MASS の光学配置。(下)MASS-DIMM を上から見た時の MASS の光学配置。LF - ファブリーレンズ、FP-焦点面、FA-焦点アパーチャー、ExP-射出瞳面、RA, RB, RC, RD-re-imaging mirror、PMT A,B,C,D-光電子増倍管 [V.Kornilov et al., 2007]



図 3.2: Segment mirror [V.Kornilov et al., 2007]

### 3.2 DIMMの光学系

DIMMの光学配置は図3.1に示している。MASSは射出瞳面でPSUに反射した光を利用しているが、DIMMはDM1,DM2に反射した光線をMRでCCDに入射している。DM1,DM2はPSUと比べて直径が大きいが、DM1, DM2, PSUの前面にあるマスク(ME04D)の大きさに制限される。よって実際に鏡として使われる直径はマスクのサイズ5.5mmに依存する。 $k=16.0$ の時、入射瞳像の直径は88mmである。また2つのマスクの口径間距離は12.1mmであり、入射瞳面では194mmに対応する。

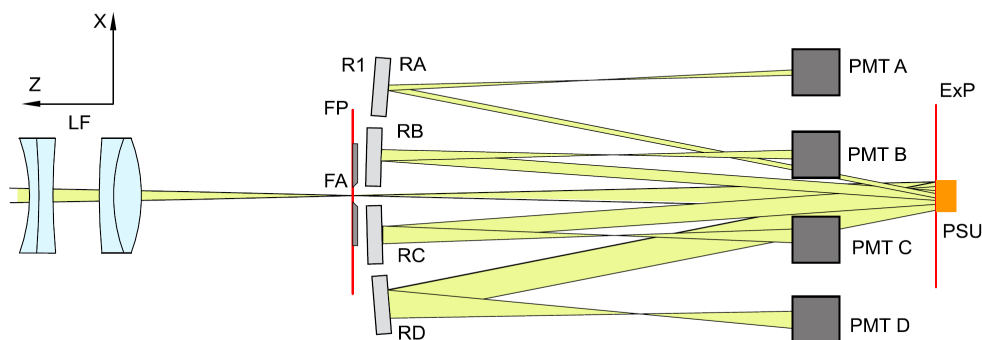


図3.3: MASS-DIMMを上から見た時のDIMMの光学配置。LF-ファブリーレンズ、FP-焦点面、FA-焦点アパーチャー、Exp-射出瞳面、DM1、DM2-DIMM re-imaging mirror、MR-折り返しミラー、PMT A-D-光電子増倍管

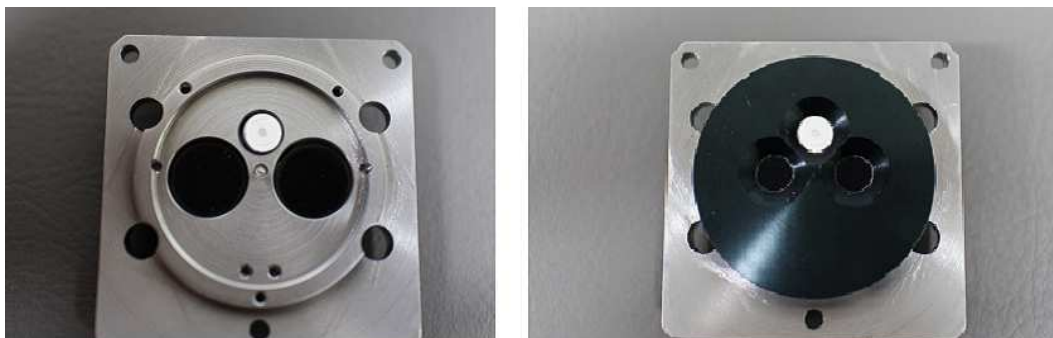


図3.4: (左)DM1、DM2、PSU (右)ミラー前面にマスクを置いた様子



### 3.3 MASS-DIMM の光学系

ここでは、MASS-DIMM 光学系の詳細について述べる。MASS-DIMM を構成する部品とそれに対応する番号を、表 3.2 に記載する。MASS-DIMM の全体図を図 3.5 と図 3.6 に示す。

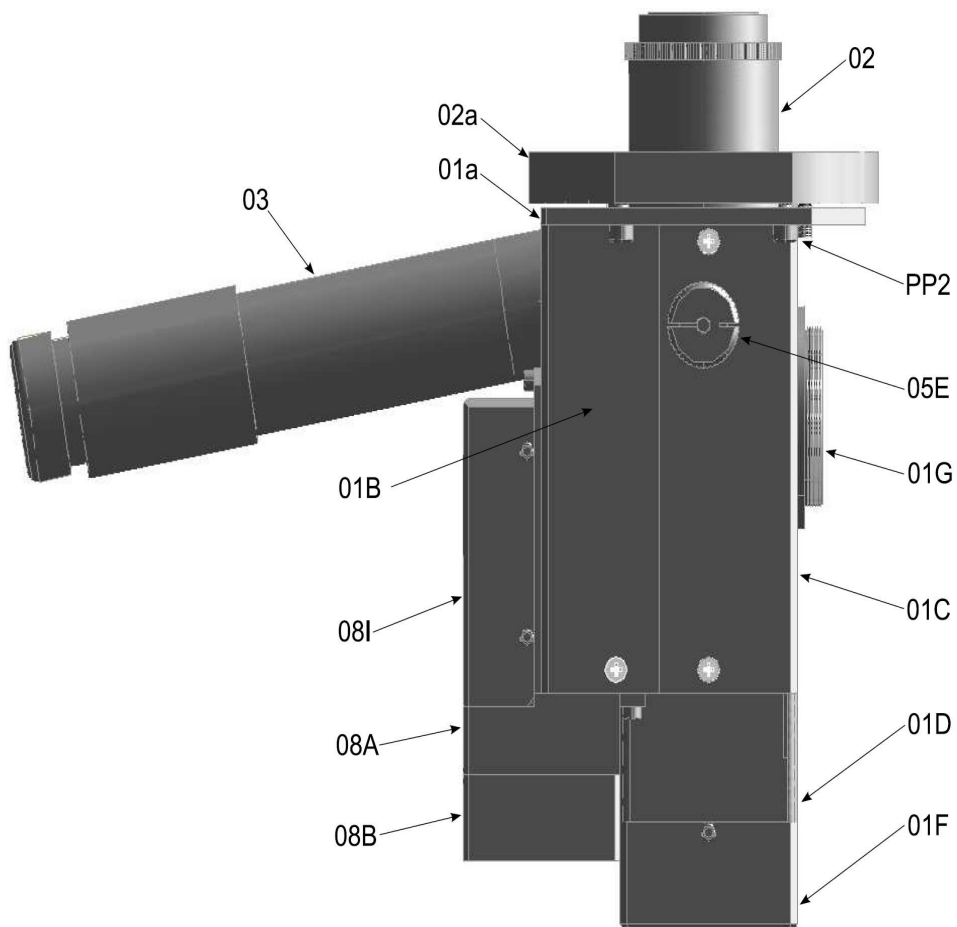


図 3.5: MASS-DIMM の側面 [V.Korinilov et al.,2007]

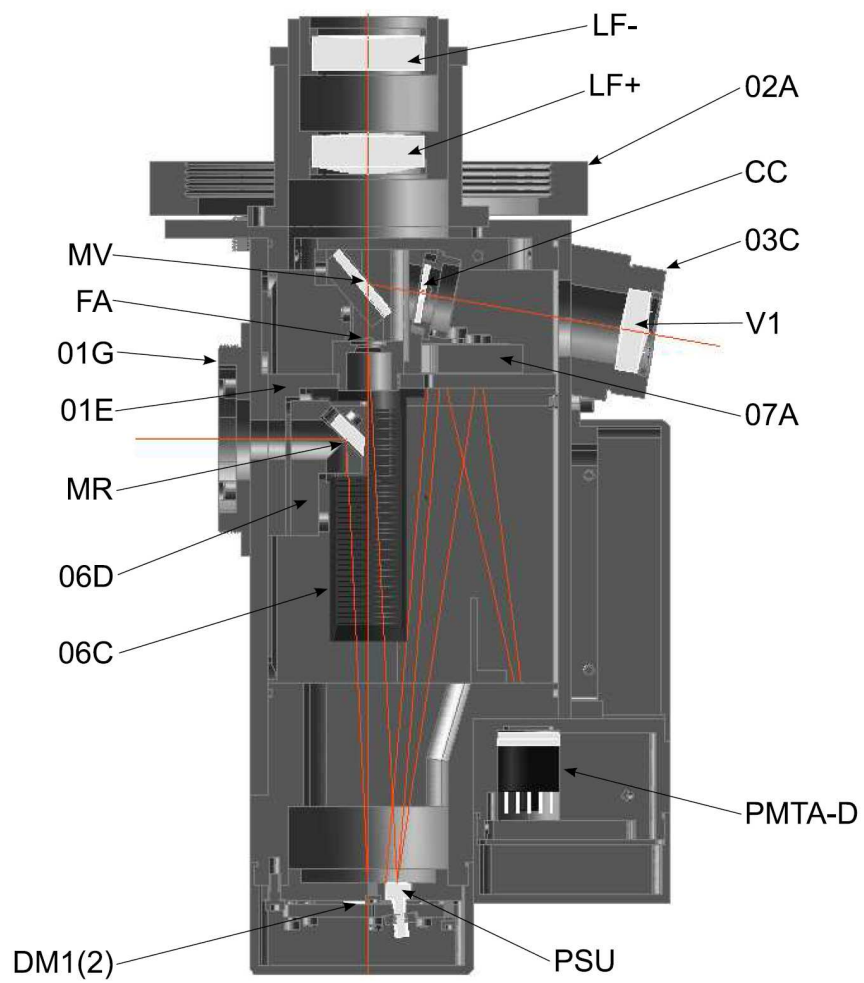


図 3.6: MASS-DIMM の断面図 [V.Korinilov et al.,2007]

表 3.2: 部品名と対応する番号

番号	部品名	番号	部品名
ME01A	Device base	ME05A	Support
ME01B	Box cover	ME05B	Mirror holder
ME01C	Main beam	ME05C	Clamping cramp
ME01D	Bottom tie	ME05D	Illuminators plate
ME01E	Optics bench	ME05E	Right axis
ME01F	Segmentator cover	ME05F	Knob axis
ME01G	CCD camera interface	ME05G	Swithing knob
		ME05I	Bushing nut
ME02	Fabry lens unit	ME05J	Left axis
ME02A	Mount ring	ME05K	switch spring
ME02B	Fabry lens tube		
ME02C	Positive lens holder	ME06A	Field aperture
ME02D	Negative lens holder	ME06B	Aperture support
ME02E	Locking nut	ME06C	Central blind
ME02F	Fixing nut	ME06D	Folding mirror support
ME02G	Fixing nut	ME06E	Spring cover plate
ME03A	Eyepiece socket	ME07A	MASS mirrors socket
ME03B	Viewer tube	ME07B	Mirrors cover plater
ME03C	Viewer socket	ME07C	PMTs side blind
ME03D	Locking nut		
ME03E	Viewer cup	ME08A	PMT house
		ME08B	Detectors cover
ME04A	PSU support	ME08C	PMT separator
ME04B	DIMM mirror plates	ME08D	Shutter blade
ME04C	MASS segmentator holder	ME08H	Shutter cramp
ME04D	Aperture mask	ME08F	Shutter lever
ME04E	PSU locking plate	ME08G	Shutter axis
ME04F	Pupil control tool	ME08H	Electronics frame
ME04G	Pupil control tool		

ファブリーレンズは、望遠鏡の焦点面よりも前に位置している。これは1枚の凸レンズと1枚の凹レンズを組み合わせた2枚のレンズシステムである(図3.7)。レンズ間の距離を変えることで、望遠鏡と MASS-DIMM を合わせた全体の光学系の有効焦点距離が変化する(図3.8)。ME02Cは凸レンズのホルダーであり、ME02Dは凹レンズのホルダーである。ME02DをME02Cに対して光軸上に動かすことで、合計焦点距離を変化させる。ME02FとME02Gはレンズホルダーをロックするために使われる。

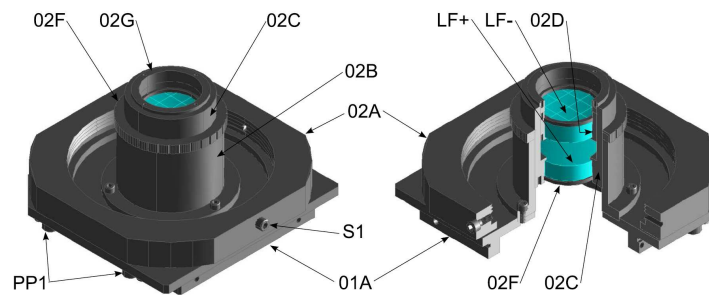


図 3.7: ファブリーレンズ [V.Korinilov et al.,2007]

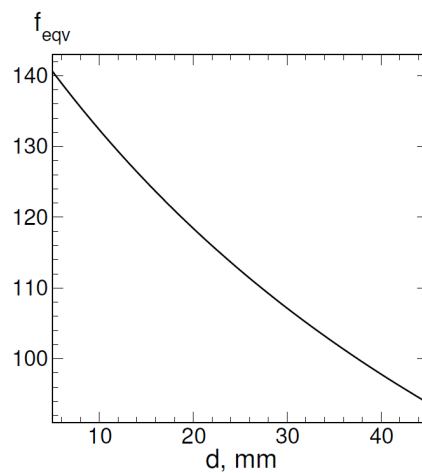


図 3.8: 2枚のレンズの間隔  $d$  に対する合計焦点距離の変化 (凸レンズの焦点距離+75mm、凹レンズの焦点距離-100mm) [V.Korinilov et al.,2007]

ME01EはOptical benchである(図3.9)。ここには3つの重要なユニットがある。1つ目はMASSのre-imaging mirrors RA、RB、RC、RDである。2つ目がフリップミラーであるVMである。これはアイピースで観測天体が視野内に入っているのを確認するために、焦点面前に置かれている。3つ目は焦点面ユニットFAである。焦点面のアパーチャーFAは、絞りの役割を果たしている。余分なスカイの光やコマ収差を減らすために、FAを導入することで視野を制限している。FAは約4秒角の直径である。

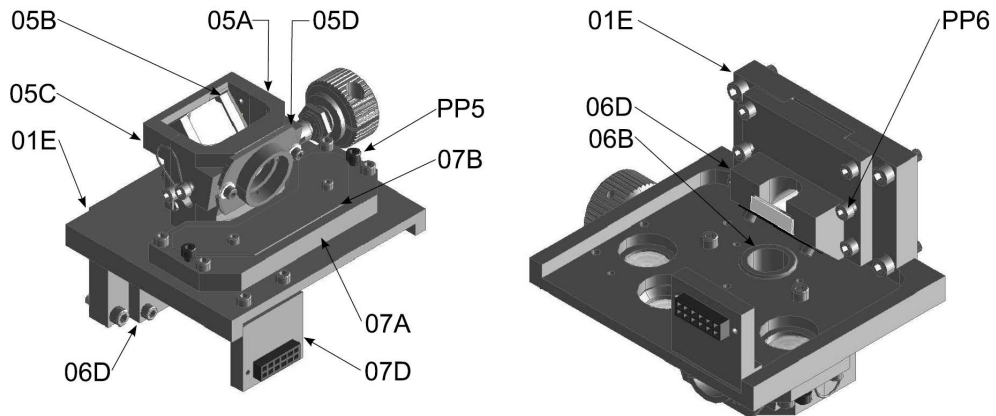


図 3.9: Optical bench [V.Korinilov et al.,2007]

ME03(Viewer)は、ME03A(アイピースソケット)とME03B(viewer tube)、ME03Cで構成されている(図3.10)。アイピースソケットは $1\frac{1}{4}$ インチ(アメリカンサイズ)の規格である。観測対象星を見つけるために、12-15mmの焦点距離を持つアイピースが推奨される。

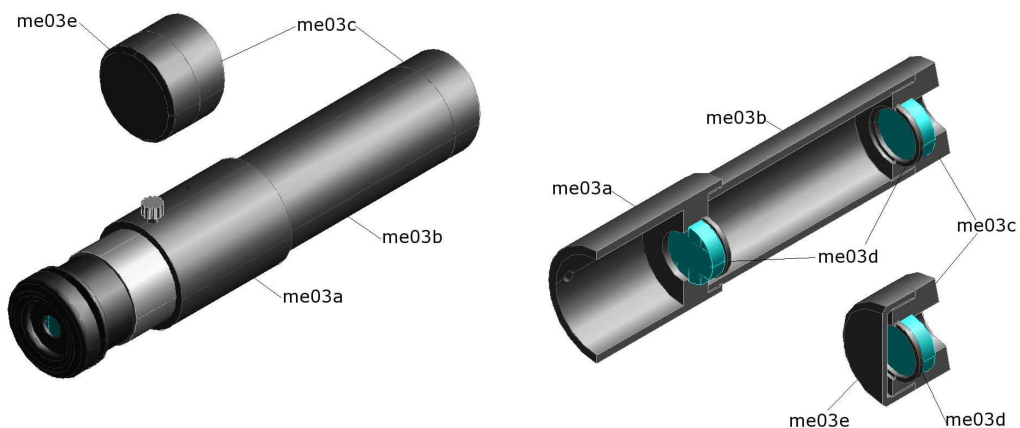


図 3.10: Viewer [V.Korinilov et al.,2007]

ME04(Optical plate) は、MASS のミラーである PSU と、2 枚の DIMM ミラー DM1、DM2 のアライメントを安定させるためのプレートである (図 3.11)。PSU は ME04C のホルダーでロックされている。また DM1、DM2 のロックは ME04B のホルダーでロックされている。ME04D は射出瞳面のマスクであり、このマスクを傾かせることで、Optical plate のミラーを光軸に対して調整することができる。

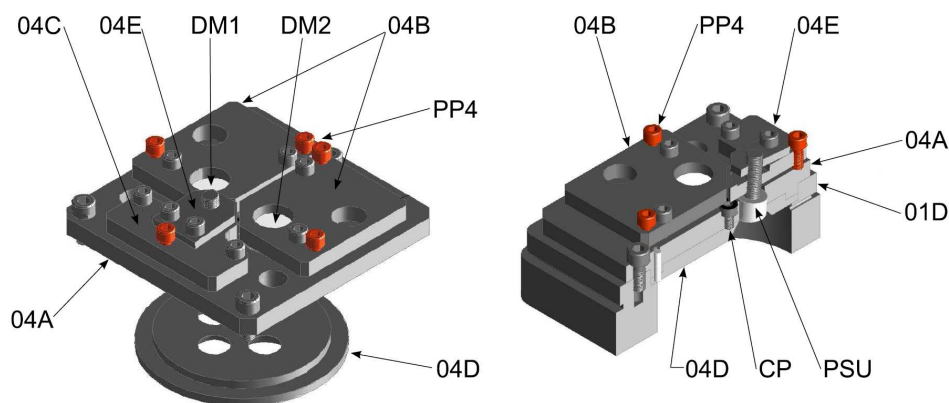


図 3.11: Optical plate [V.Korinilov et al.,2007]

電気モジュールである ME08 は、MASS 検出器である PMT とその電気系で構成されている (図 3.11)。ME08A には、4 つの PMT と機械式シャッターが含まれている。PMT は浜松ホトニクス の R7400 を使用している。機械式シャッターは 2 枚の鉄の刃とホールで構成されており、ME08G(シャッターノブ) でシャッターを開閉することができる (図 3.13)。PMT を直接光から防ぐために、測定以外ではシャッターは常に閉めておかなければならない。

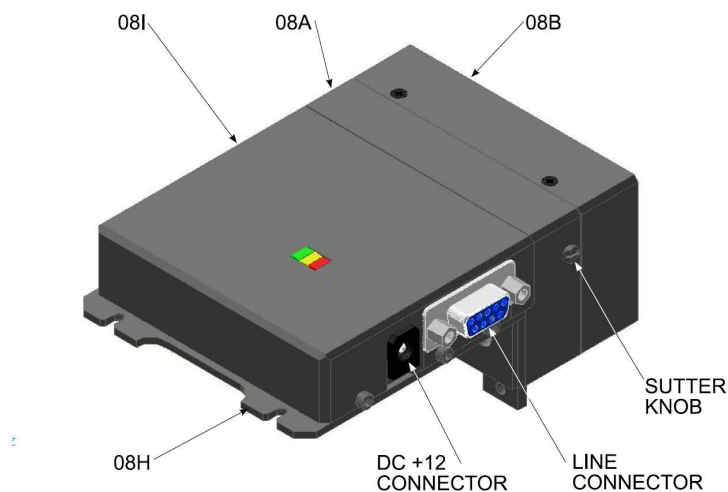


図 3.12: Electronics module [V.Korinilov et al.,2007]



図 3.13: マニュアルシャッター

### 3.4 アライメント

MASS-DIMM の組み立て工程時に、ほとんどの光学アライメントは行われている。しかし MASS-DIMM を望遠鏡に取り付ける時に、いくつかのアライメントを行う必要がある。ここでは、測定前に行ったアライメントの方法を説明する。

#### 3.4.1 MASS 光学系のアライメント

PSU の光軸に対する傾きと回転軸の調整を行う。この作業は望遠鏡に取り付けずに行う。始めに ME08(電気モジュール) を MASS-DIMM から外す。次に ME01B(サイドカバー) と ME01F(底のカバー)、FL(ファブリーレンズ) を外す(図 3.14)。ビームを FA に直接入射して、MASS の re-imaging mirror RA、RB、RC、RD にビームが当たっているか確認する。当たっていない場合は、ME04(Optical plate) の ME04C の 2 つの引きネジ、1 つの押しネジを使って、re-imaging mirror にビームが当たるように PSU の傾きと回転軸を調整する(図 3.11)。PSU の 4 つのアパーチャーの中でアパーチャー D が最も大きいので、RD には最も注意しなければならない。

#### 3.4.2 DIMM 光学系のアライメント

このアライメントの前に、ME06C を外しておく。MASS-DIMM を望遠鏡に取り付けて、望遠鏡を明るい光源へ向けておく。ME04(Optical plate) の 4 つの引きネジ、4 つの押しネジを使って、DIMM のミラー DM1、DM2 の傾きを調整することができる(図 3.11)。これらのネジで CCD フレームに写っている 2 つのイメージを中央に持つてくる。そして 2 つのイメージをある程度離すように、CCD フレームに対して水平垂直になるように調整する(図 3.15)。

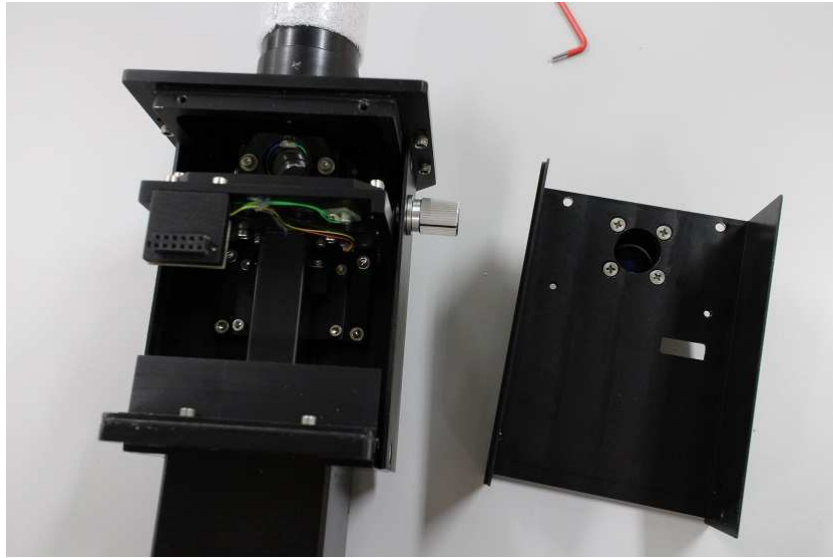


図 3.14: ME01B を外した様子

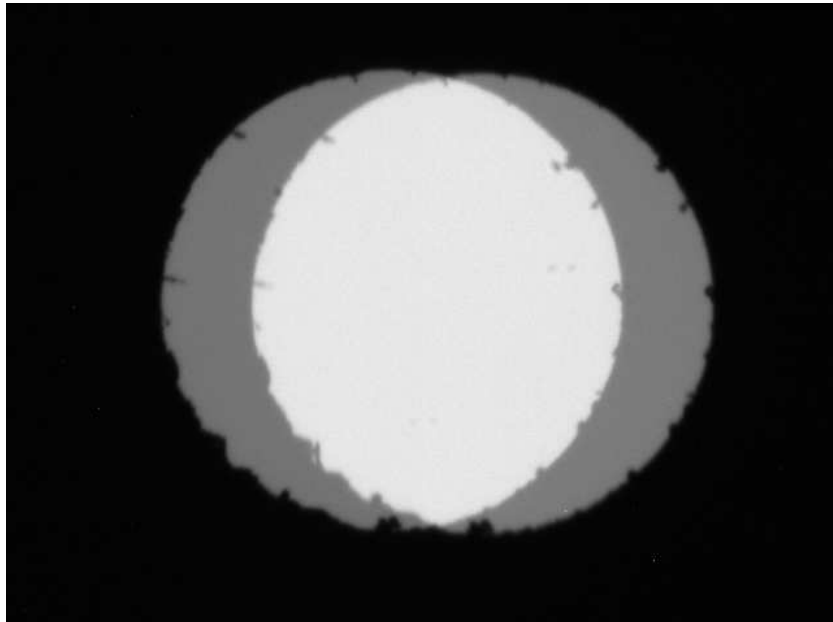


図 3.15: DIMM アライメント



### 3.4.3 ファブリーレンズのアライメント

FL(ファブリーレンズ)のフォーカシングを行う。この行程は望遠鏡に取り付けて行う。望遠鏡を事前に無限遠にする。MASS-DIMMからME01B(サイドカバー)とME01E(Optical bench)、ME04(Optical plate)を取り外して、代わりに pupil control unit を取り付ける(図 3.16)。これはマスクを通して入射瞳のイメージを見ることができる。望遠鏡を白い壁に向けて、望遠鏡の開口径全体を照らすようにする。ME01A の押しネジで MASS-DIMM を傾けて、入射瞳像がマスクのホールに対して均等になるようにする。望遠鏡の開口径に、フラットで不透明なもの(定規など)を置く。pupil control unit を通してこの物体のイメージを観察する。FL が正しくフォーカシングされていなければ、このイメージがボケて見える。よってイメージがシャープになるように、FL を調整する

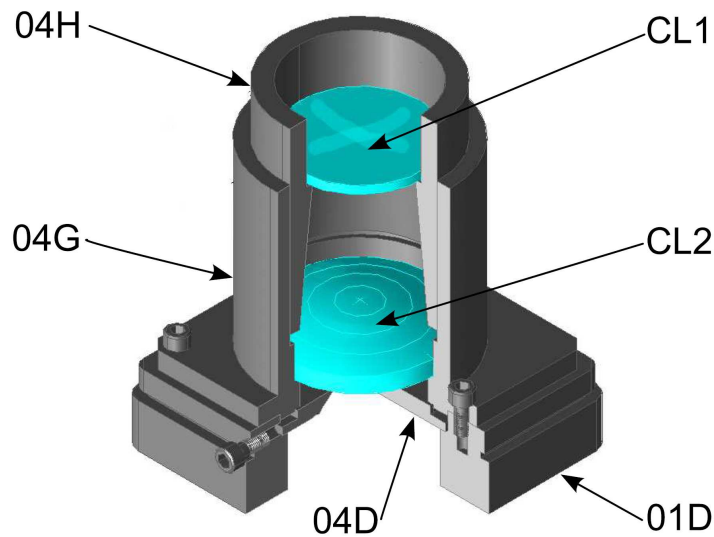


図 3.16: Pupil control unit [V.Korinilov et al.,2007]

#### 3.4.4 システムの倍率係数

以上のアライメントを行った後、最後に倍率係数  $k$  の測定を行う。この測定は FL のアライメントの続きとなる。pupil control unit の ME04H を取り外して、CL2(レンズ) に強い光を当てると、望遠鏡の開口部分に ME04D のマスクのイメージが投射される (図 3.17)。そのイメージの直径をノギスで測定する。またこの時に、イメージのエッジ部分がけられていないことを確認する。倍率係数は測定されたサイズから計算することができる。



図 3.17: 射出瞳像

#### 3.5 本測定での変更点

今回の測定で使用する MASS-DIMM は、国立天文台ハワイ観測所が所有している MASS-DIMM MD26(製造番号) を借用している。この MD26 は、Meade LX-200 望遠鏡と SBIG 社の CCD カメラである ST-2000 の使用を前提として制作されている。しかし測定では Celestron C11 望遠鏡と Prosilica 社の CCD カメラである GE-680 を使用するために、MD26 のいくつかの部品を取り替えた。変更した部品の製図は付録 A に記載する。

MD26 の CCD インターフェース (ME01G) は、SBIG 社の ST-2000 の仕様を前提とした設計である。今回の測定で使用する GE-680 は C マウントなので、C マウント用のインターフェース (ME01G) を作成した (図 6.3)。そして CCD カメラを適切な位置で止めるための止め輪 (ME01H) を作成した (図 6.4)。Meade 社の望遠鏡と Celestron 社の望遠鏡のマウント部の大きさが異なるので、MD26 のマウントリング (ME02A) を変更した (図 6.1)。この時マウントリング (ME02A) のネジの位置を間違えて設計したため、MD26 に接続させることができなかつたので、MASS-DIMM 本体とマウントリング (ME02A) をアダプターで繋げている (図 6.2)。

### 3.6 望遠鏡

・Celestron C11



図 3.18: Celestron C11

表 3.3: 望遠鏡の仕様

口径	280mm (11 インチ)
口径比	F/10
焦点距離	2800mm
サイズ	長さ約 600mm、外径約 320mm
重さ	約 12kg

この Celestron C11 望遠鏡は、MASS-DIMM に対して最適な光学パラメータを持つ望遠鏡の 1 つとして挙げられている [V.Kornilov et al. 2007]。

### 3.7 赤道儀

・高橋製作所 EM-200 Temma2

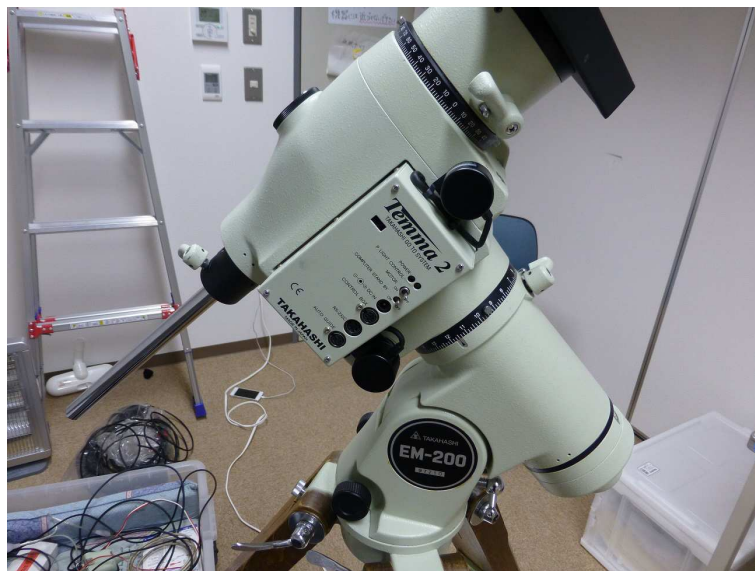


図 3.19: EM-200 Temma2

表 3.4: 赤道儀の仕様

形式	2軸モーター内蔵、ドイツ式赤道儀
赤経微動, 赤緯微動	ステッピングモーターによる電動駆動
搭載質量	約 16kg
本体質量	約 15.5kg (バランスウエイト別)
電源電圧	定格 DC24V
自動導入	パソコンを接続することにより可能

表 3.4 で記載されている通り、EM-200 Temma2 は余裕を持って C11 を搭載することが可能である。今回の測定におけるこの赤道儀の利点として、PC の天文用ソフトウェアを利用して赤道儀を制御できることが挙げられる。DIMM の測定では、CCD のソフトウェアを使用してリアルタイムで視野内の様子を確認することができる。測定では非常に狭い視野を使うため、数分で観測対象の恒星が画面から移動してしまう。そこでソフトウェアから赤道儀を制御して、数分に 1 度恒星を視野の中心に入れることで効率よく測定を行うことが可能となる。今回の測定では、アストロアーツ社の天文用ソフトウェア、ステラナビゲーター Ver.9 を使用した。

### 3.8 CCD カメラ

・Prosilica GE-680



図 3.20: Prosilica GE-680(Allied Vision Technologies Canada Inc. より)

表 3.5: CCD カメラの仕様

有効画素数	480(H) × 640(W)
センサーサイズ	1/3 インチ
セルサイズ	7.4 $\mu$ m
レンズマウント	C
A/D	12bit
露出時間	25 $\mu$ s-60s
最大フレームレート	205fps
プリアンプゲイン	0dB-24dB
重量	169g
サイズ	39mm(縦)、51mm(横)、80mm(長さ)
インターフェース	Gigabit Ethernet

DIMM の測定を行うために、高いフレームレートかつ十分に短い露出時間で撮像できる CCD カメラが必要となる。このカメラの最小露出時間は 25 $\mu$ s である。また PC から非常に離れたところで測定を行うため、容量の大きい画像データを高速で転送できる Gigabit Ethernet は DIMM 測定で大きな利点である。

以下では CCD カメラの読出しノイズ、ゲイン、望遠鏡に装着したときのピクセルスケールの測定について記載している。これらのパラメータは、後述で記載する DIMM シーイングの計算のために必要となる。フレームの測光、1 次処理には、天文画像データ解析ソフトウェア NOAO/IRAF を用いた。

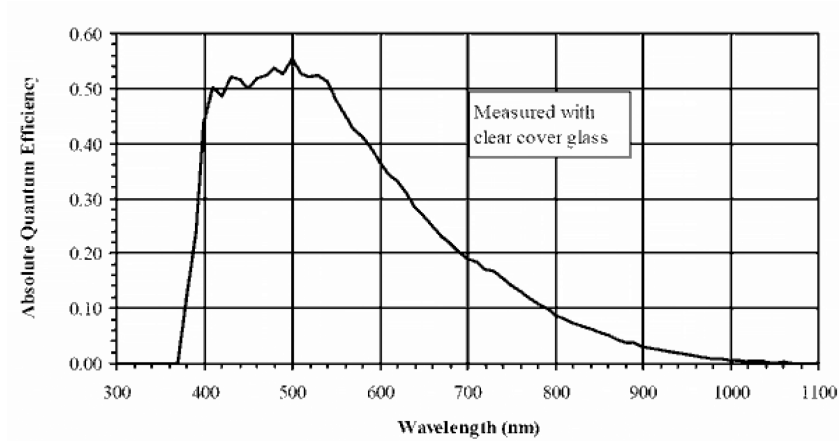


図 3.21: CCD の感度曲線 (Allied Vision Technologies Canada Inc. より)

### 3.8.1 読み出しノイズ

読み出しノイズとは、CCD に蓄積した電荷を読み出すときに発生するランダムノイズである。読み出しノイズは、2枚のバイアスフレームから求めることができる。

$$\text{Read noise[ADU]} = \frac{\sigma_{B_1-B_2}}{\sqrt{2}} \quad (3.1)$$

式 (3.1) を使い、CCD の読み出しノイズ [ADU] を測定した。

DIMM の測定で使用したプリアンプゲイン (12dB, 16dB, 18dB, 20dB, 24dB) と、比較のために 0dB 時の読み出しノイズを測定した。暗室でバイアスフレームを取得し、その内 2枚のフレームの差のフレームカウントの標準偏差  $\sigma_{B_1-B_2}$  を求める。ここでのバイアスフレームは、CCD の最小積分時間である  $2.5\mu\text{s}$  で取得している。結果は表 3.6 に記載している。

表 3.6: 測定した読み出しノイズ [ADU]

プリアンプゲイン [dB]	$\sigma_{B_1-B_2}$	Read noise[ADU]
0	$10.03 \pm 0.02$	$7.090 \pm 0.013$
12	$35.59 \pm 0.10$	$25.17 \pm 0.07$
16	$51.70 \pm 0.19$	$36.56 \pm 0.13$
18	$62.04 \pm 0.18$	$43.87 \pm 0.13$
20	$74.27 \pm 0.22$	$52.52 \pm 0.15$
24	$113.5 \pm 0.4$	$80.24 \pm 0.29$

### 3.8.2 ゲイン (A/D 変換係数)

CCD のゲインとは、CCD に蓄積された電荷量を AD 変換を行う際の、電荷量と出力信号の変換係数である ( $e^-/\text{ADU}$ )。ゲイン  $G[e^-/\text{ADU}]$  の時、 $I[e^-]$  から  $V[\text{ADU}]$  が求まる。

$$V = GI \quad (3.2)$$

読み出しノイズによる分散値を  $\sigma_r^2$  とすると、カウントの分散値を  $\sigma_I^2$  は、次の関係式で表すことができる。

$$\sigma_I^2 = I + \sigma_r^2 \quad (3.3)$$

式 (3.3) に式 (3.2) を代入すると

$$\sigma_V^2 = \frac{V}{G} + \sigma_r^2 \quad (3.4)$$

従ってカウントと分散値の 1 次方程式の傾きから、CCD のゲインを求めることができる。以下に詳細な測定方法を示す。

読み出しノイズの測定時と同じく、DIMM の測定で使用したプリアンプゲインと 0dB 時のゲインの測定を行った。測定には安定した光源が必要なので、安定化電源を使って 10mA の安定した電流を流した LED を使用した。LED の光を均一かつ減光するために、LED と CCD の間には図のように拡散板とトレーシングペーパーを挟んだ。また CCD の露出時間を変えて撮像することで、フラットフレームのカウント値を変えている。バイアスフレームを取得して、測光の前にフラットフレームから減算している。40pixel×40pixel の領域をとり、その中で分散とカウントを計算している。横軸にカウント、縦軸に分散をとり、1 次関数でフィッティングした。この 1 次関数の切片は、分散値が読み出しノイズの 2 乗に相当するので、前項で測定した読み出しノイズを  $b$  の値に予め代入している。その傾きの逆数からゲインを求めた。

表 3.7: 測定したゲイン [ $e^-/\text{ADU}$ ]

プリアンプゲイン [dB]	Gain [ $e^-/\text{ADU}$ ]
0	$2.517 \pm 0.059$
12	$0.5839 \pm 0.0155$
16	$0.3196 \pm 0.0103$
18	$0.2567 \pm 0.0113$
20	$0.1835 \pm 0.0072$
24	$0.09890 \pm 0.00615$

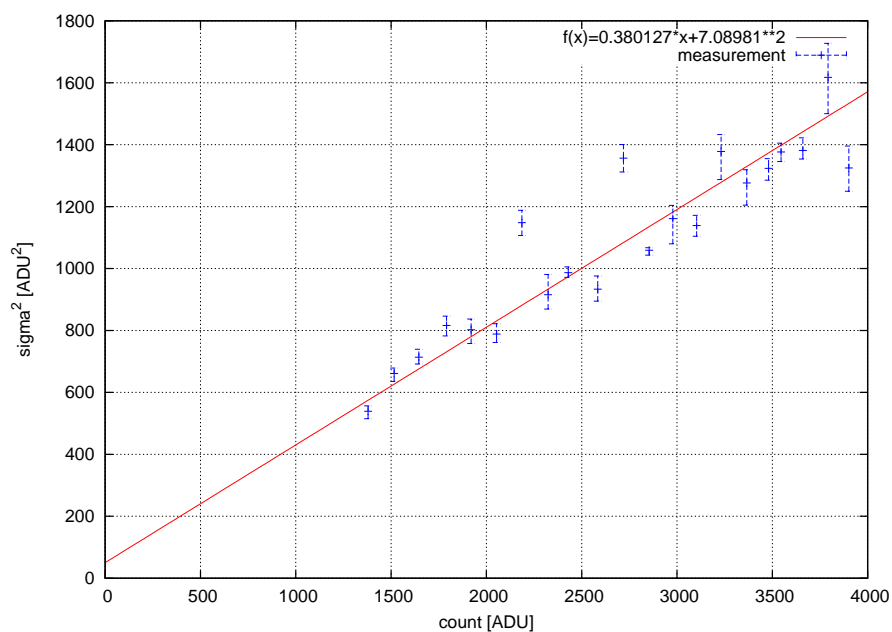


図 3.22: プリアンプゲイン 0dB のゲイン [ $e^-$ /ADU] (横軸:カウント [ADU]。縦軸:分散 [ $\sigma^2$ ])

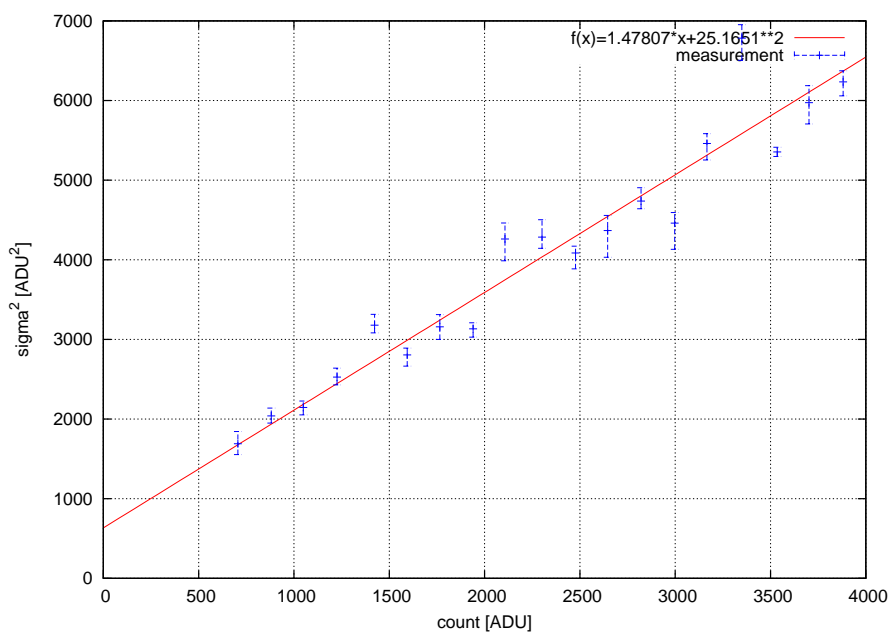


図 3.23: プリアンプゲイン 12dB のゲイン [ $e^-$ /ADU] (横軸:カウント [ADU]。縦軸:分散 [ $\sigma^2$ ])



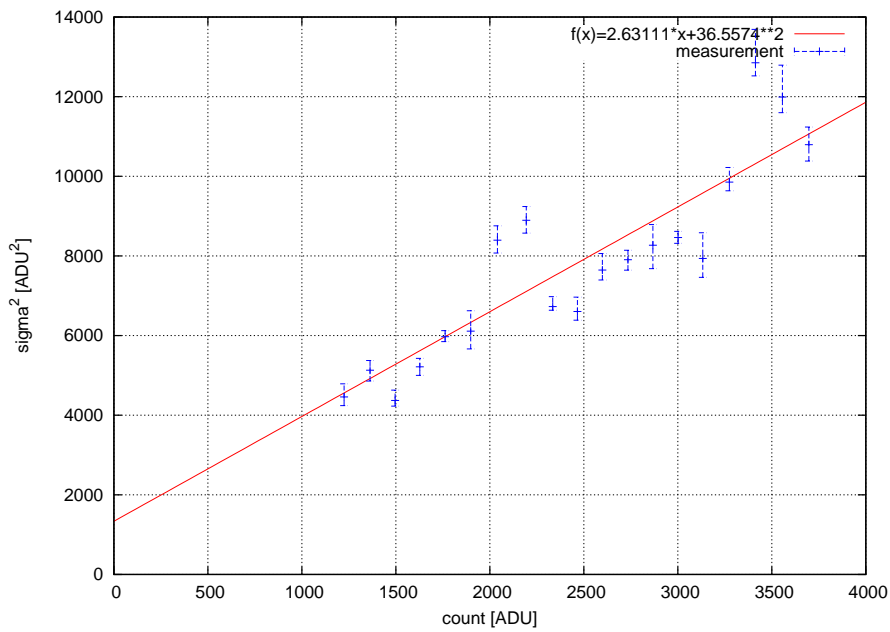


図 3.24: プリアンプゲイン 16dB のゲイン [ $e^-/\text{ADU}$ ] (横軸:カウント [ADU]。縦軸:分散 [ $\text{sigma}^2$ ])

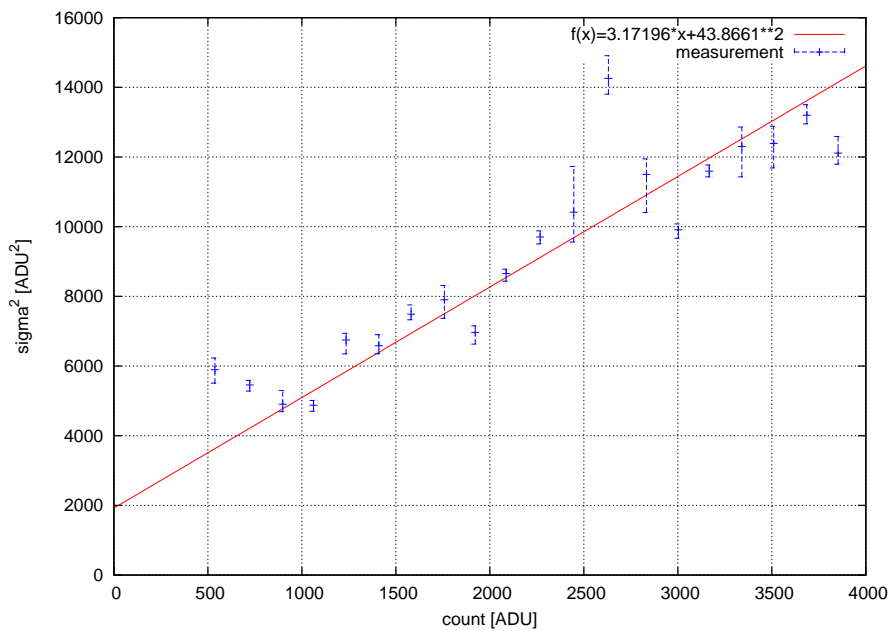


図 3.25: プリアンプゲイン 18dB のゲイン [ $e^-/\text{ADU}$ ] (横軸:カウント [ADU]。縦軸:分散 [ $\text{sigma}^2$ ])

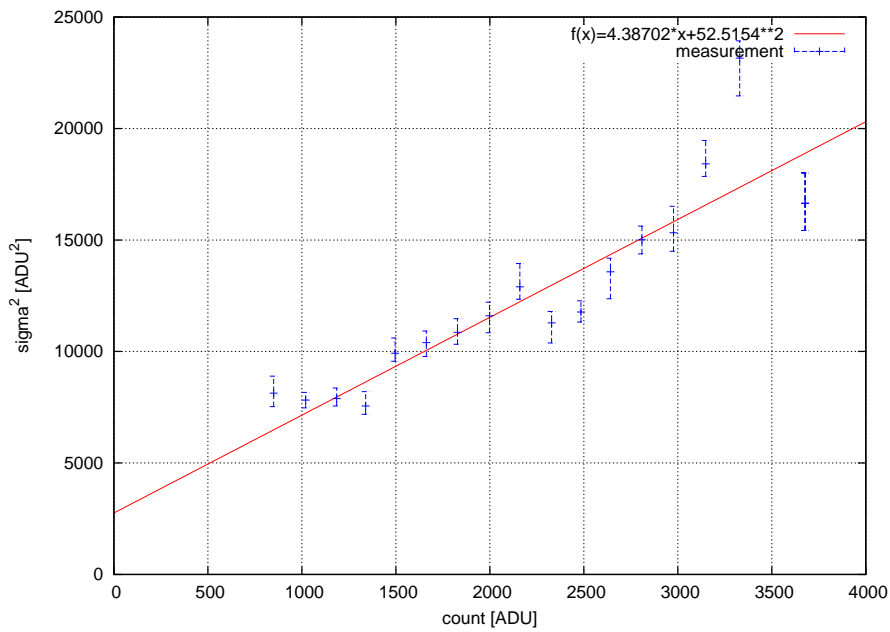


図 3.26: プリアンプゲイン 20dB のゲイン [ $e^-/\text{ADU}$ ] (横軸:カウント [ADU]。縦軸:分散 [ $\text{sigma}^2$ ])

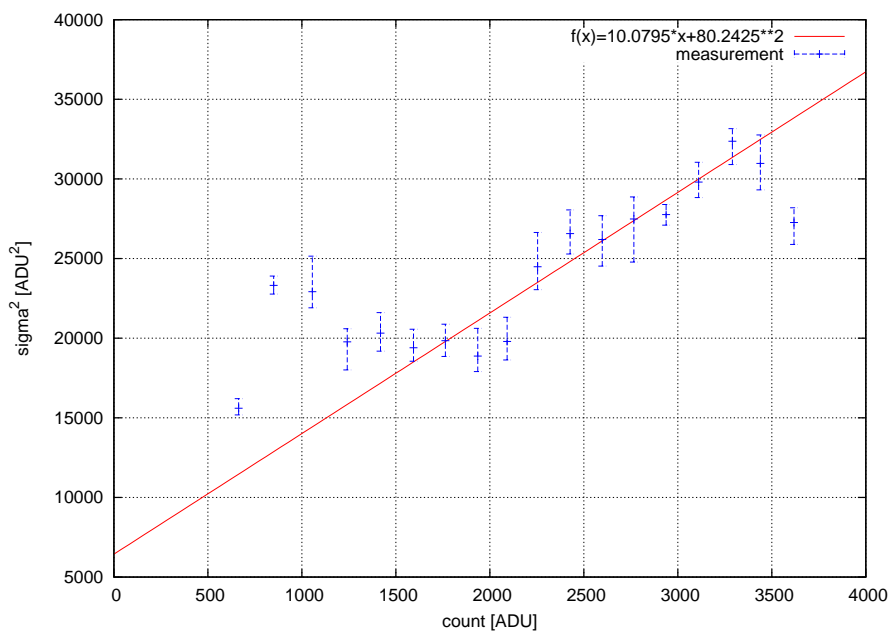


図 3.27: プリアンプゲイン 24dB のゲイン [ $e^-/\text{ADU}$ ] (横軸:カウント [ADU]。縦軸:分散 [ $\text{sigma}^2$ ])

プリアンプゲインが大きくなればなるほど、特に 24[dB] では、カウント値が 1500[ADU] 以下での分散値が非常に大きい。ゲインが大きいと読み出しノイズ [ADU] の影響が大きくなるが、測定した分散値は読み出しノイズの約 5 倍の大きさである。よって読み出しノイズでは、この分散値の大きさの説明がつかない。他には CCD の感度ムラや、 $\gamma$  値の設定などが考えられるが、現状では原因を特定できていない。

プリアンプゲインの単位は [dB] なので、 $\text{gain}[\text{dB}] = 20\log_{10}(y/x)$  と表すことができる ( $x$  は入力、 $y$  は出力)。 $y/x$  は増幅率であり、CCD のゲイン [ $e^-/ADU$ ] の逆数と対応する。測定したゲインの値をグラフにプロットして、この関数を使ってフィッティングを行った (図 3.28)。フィッティングの結果、関数は  $\text{gain}[\text{dB}] = 18.2015\log_{10}(2.51927/\text{Gain})$  となった。この結果は dB の公式と似たような形を取るため、測定されたゲインの値は大きく間違っていないことが分かった。よって DIMM のシーイングの計算では、測定したゲインの値をそのまま使用している。

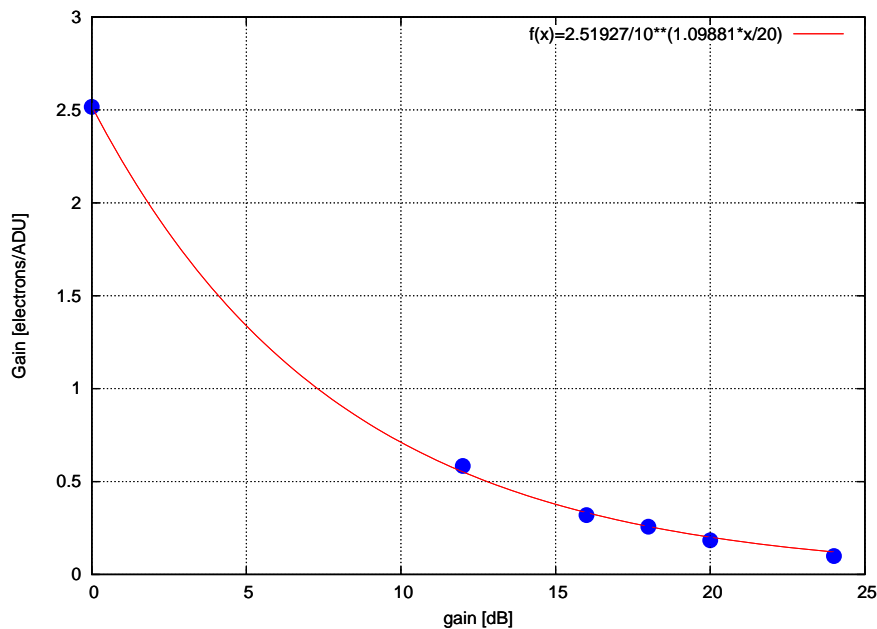


図 3.28: 測定したゲインのフィッティング結果 (横軸:プリアンプゲイン [dB]。縦軸:ゲイン [ $e^-/ADU$ ])

### 3.8.3 ピクセルスケール

2013年11月05日に、Celestron C11 望遠鏡に MASS-DIMM を取り付けた時の CCD カメラのピクセルスケールを、2重星を用いて測定した。測定に用いた2重星は、はくちょう座のアルビレオである。アルビレオは、V等級が3等と5等の2つの天体から成り立っており、天体間の距離は34.49[arcsec](2012年)である (<http://ad.usno.navy.mil/wds/>)。

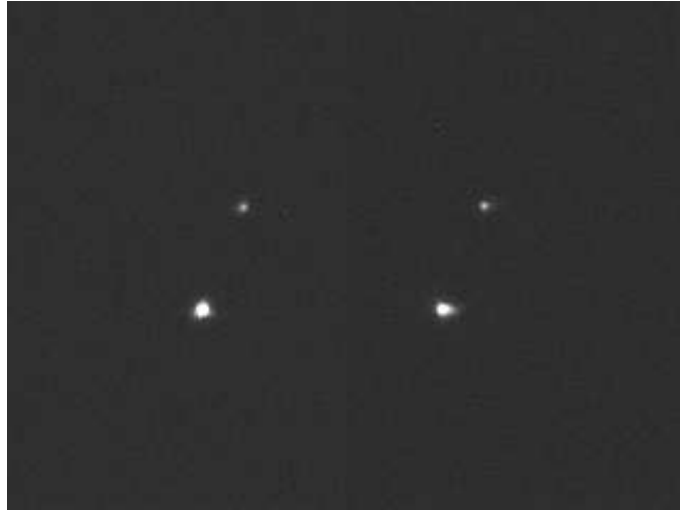


図 3.29: 撮像したアルビレオのイメージ

0.5msの露出時間で、アルビレオを撮像した(図3.29)。IRAFで100枚のイメージを加算して、imexamタスクで2つの星の重心を算出した。そしてアルビレオの天体距離[arcsec]を求めた重心間距離で割ることで、ピクセルスケール[arcsec/pixel]を算出した。計算の結果、ピクセルスケールのサイズは0.658[arcsec/pixel]であった。後述のDIMMのシーイングの計算では、このピクセルスケールの値を使用した。

## 3.9 ソフトウェア

### 3.9.1 Turbina version 2.06

MASS の制御と測定には、Kornilov 氏らが開発した Turbina を使用した。MASS 装置のコントロール、データの取得、そしてデータ解析を行う。MASS のデータは 1 分間を 1 セットとして扱う。PMT の露出時間は数 ms で、露出の間に数秒のベースタイムを設けている。

MASS で測定を行う順序としては、まず始めに Initialization (Tool menu-Initialization) を行う。これは、Turbina を立ち上げるたびに行わなくてはならない必須の作業である。次に星のない領域に望遠鏡を向けて、バックグラウンドの測定を行う (Measurements-Background)。その後測定対象の天体を導入し、対象天体を星のリストから選択する (File-Show star)。対象が導入できているかフラックスの確認をした後に (Measurements-Flux estimation)、MASS の測定を開始する (Measurements-Run measurement)。

### 3.9.2 VimbaViewer version 1.2

AVT 社の VimbaViewer は、DIMM 測定用 CCD である Prosilica GE-680 の制御ソフトウェアである。このソフトウェアで、CCD の露出時間、FPS、プリアンプゲイン、bit 数、ピクセル領域を変えることが出来る。DIMM の測定は、5 分間を 1 セットとする。10 [fps] で連続撮像をしているので、1 セットあたり 3000 枚の画像データを扱う。撮像したイメージデータは bin ファイルで出力される。観測の終了後、bin ファイルを 1 セットごとにまとめて FITS キューブに変換する。

### 3.9.3 ステラナビゲーター version 9

今回の測定で使用した赤道儀、高橋製作所 EM-200 Temma2 は、市販の天文ソフトと接続することでコントロールすることができる。そのために使用した天文ソフトウェアが、ステラナビゲーター version 9 である。このソフトウェアで赤道儀の追尾スピードの変更 (恒星追尾のノーマルスピードモード、ハイスピードモード)、赤径赤緯方向の移動、そして自動導入を行うことができる。Celestron C11 の焦点距離は 2800mm と長く、赤道儀はガイドを行っていないので、10 分ほど経つと視野から観測天体がいなくなってしまう。しかし CCD のイメージを使って視野内の様子をリアルタイムで確認することができるので、時々ステラナビゲーターで赤道儀を動かし、視野中心に観測天体を入れ直している。

## 3.10 データ送信受信の流れ

測定では、図 3.30 のようにケーブルを接続している。測定機器は屋内にある PC とデータのやりとりを行う。MASS-DIMM のデータ送受信は RS485 ケーブルで行われる。CCD の Gigabit Ethernet は、ハブを使って中継している。また赤道儀のシリアルデータを市販のデバイスサーバ (NPORT) でイーサネット変換して、ネットワークを介してステラナビゲーターとデータの送受信を行っている。

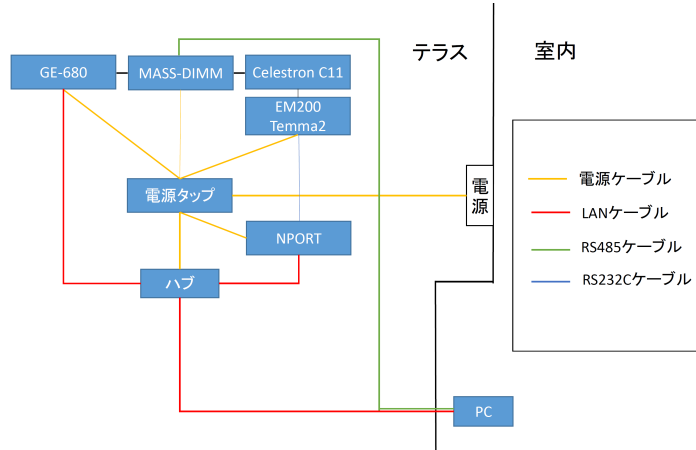


図 3.30: 機材の配線図

### 3.11 DIMM のデータ処理

MASS とは違い、DIMM のシーイングの計算は測定後にまとめて行った。MASS のデータは 1 セット 1 分間なので、DIMM のシーイングも 1 セット 1 分間、計 600 枚の画像データを使って計算した。

重心の計算は、x 軸 y 軸に分けて行った。x 軸の重心は次のように定義される。

$$x_G = I_{tot}^{-1} \int xI(x, y) dx dy \quad (3.5)$$

ここで  $I_{tot}$  はピクセル強度の合計である。今回の DIMM の重心計算では、Windowing の方法を使った。Windowing は、星像の中心からある程度の範囲のウィンドウを設定し、その範囲内で重心計算を行う方法である。Windowing の星像の中心とは、星像のピーク値の x,y 座標である。Windowing での重心は次のように計算する。

$$x_w = \frac{\sum_{\text{window}} x_{ij} I_{ij}}{\sum_{\text{window}} I_{ij}} \quad (3.6)$$

DIMM の計算では window は四角形の形をとっている。この重心計算では、window 内のノイズの影響で重心エラーが起きる。このノイズ分散の値は、像の相対的な重心揺らぎの分散である (2.34) 式、(2.35) 式に加わり、測定したシーイングの値が悪くなってしまう。そこでこのノイズ分散を見積もり、重心揺らぎの分散から減算することで正確なシーイングの値を計算する。

$$\sigma_c = \frac{1}{I_0^2} \sum_{i,j} (x_{i,j} - c_x)^2 (R^2 + I_{i,j}/G) \quad (3.7)$$

$R$  は読み出しノイズ [ADU] で、 $G$  は CCD のゲイン [ $e^-$ /ADU] である。また  $c_x$  は重心の位置であり、 $I_0$  は window 内のピクセル強度の合計である。

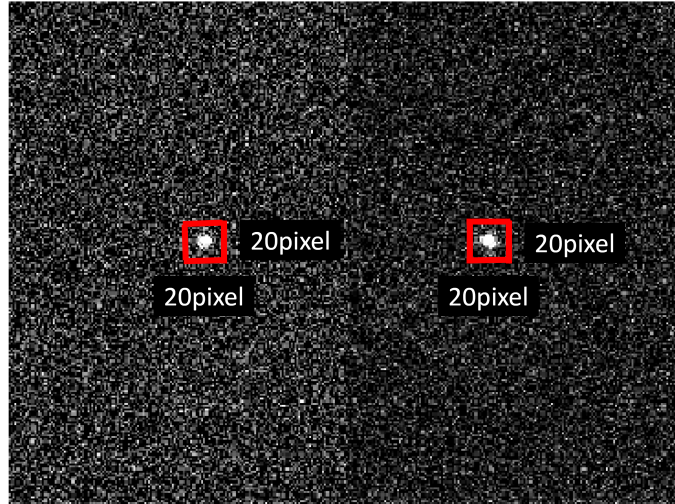


図 3.31: DIMM のイメージ。赤い四角形が window。重心計算では 20pixel×20pixel の範囲を取っている。

### 3.12 測定場所

北海道大学大学院理学研究院附属天文台の座標は東経 142.5°、北緯 44.4°、標高は海拔 151m である。MASS-DIMM の測定場所は、この天文台の 2 階のテラスである。建物の壁で発生する乱流の影響を減らすため、テラスの中央で測定を行った。



図 3.32: 機材を展開した様子

## 4 測定結果

2013年09月から2014年02月にかけて、ほぼ1か月おきに約10日間の測定を行った。測定を行った日と、測定に成功した日を月ごとで表4.1に掲げる。ここでの測定に成功した日とは、MASSとDIMMの両方の測定データを1回でも得られた日のことを指す。

表 4.1: 2013 年測定結果

測定期間	測定成功日	測定日数	成功日数
2013			
09/13–09/22	17,18,19,20,21,22	11 日間	6 日
10/15–10/25	16,17,18,19,21,22,23	11 日間	7 日
11/05–11/15	05,11,13,15	11 日間	4 日
12/09–12/17	16	9 日間	1 日
2014			
02/03–12/12	04,05,07,08,12	10 日間	5 日

全52日中23夜の測定に成功した。本章では、その結果を報告する。なお全体のまとめと考察は次章で行う。

結果ではグラフが縦に2つ並んだグラフと、グラフが縦に3つ並んだグラフを記載している。1つ目のグラフについて説明する。上のグラフは大気擾乱高度プロファイルであり、これは  $C_n^2$  の時間変動をプロットしたものである。6つの高度でプロットしていて、青色が0.5 km、赤色が1 km、緑色が2 km、黄色が4 km、桃色が8 km、そして水色が16 kmの  $C_n^2$  である。下のグラフは測定したシーイングの時間変動である。桃線がMASSで測定したMASSシーイング、緑線がDIMMで測定したDIMMシーイング、そして青線が(2.39)式によって求められたGLシーイングを表している。

2つ目のグラフは、測定したシーイングのヒストグラムである。上のグラフはDIMMシーイング、真ん中のグラフはMASSシーイング、下のグラフはGLシーイングのヒストグラムである。グラフの右上には、シーイングの中央値と平均値を記載している。グラフに2つのピークがある場合は、シーイングを高い値と低い値の2つに分けて、それぞれで中央値と平均値を求めている。



#### 4.1 2013年09月17日

20時43分からはくちょう座デネブ(視等級1.25等)、23時50分からぎょしゃ座カペラ(視等級0.08等)を参照星にした。18時から21時30分まで快晴だったが、23時30分まで雲が通過していた。その後雲の通過と快晴を何度か繰り返している。00時にはあたりが完全に雲に隠れてしまい、晴れる見込みがなかったので観測を終了した。

表 4.2: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$3.10 \pm 0.37$	3.05
MASS	$1.93 \pm 0.43$	1.90
GL	$1.90 \pm 0.40$	1.98

表 4.3:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$3.02 \times 10^{-13} \pm 6.38 \times 10^{-14}$	$3.00 \times 10^{-13}$
8	$6.46 \times 10^{-14} \pm 6.96 \times 10^{-14}$	$3.97 \times 10^{-14}$
4	$1.72 \times 10^{-13} \pm 1.49 \times 10^{-13}$	$1.26 \times 10^{-13}$
2	$9.72 \times 10^{-13} \pm 5.64 \times 10^{-13}$	$9.26 \times 10^{-13}$
1	$1.59 \times 10^{-13} \pm 2.51 \times 10^{-13}$	$7.02 \times 10^{-14}$
0.5	$2.11 \times 10^{-13} \pm 2.55 \times 10^{-13}$	$8.96 \times 10^{-14}$

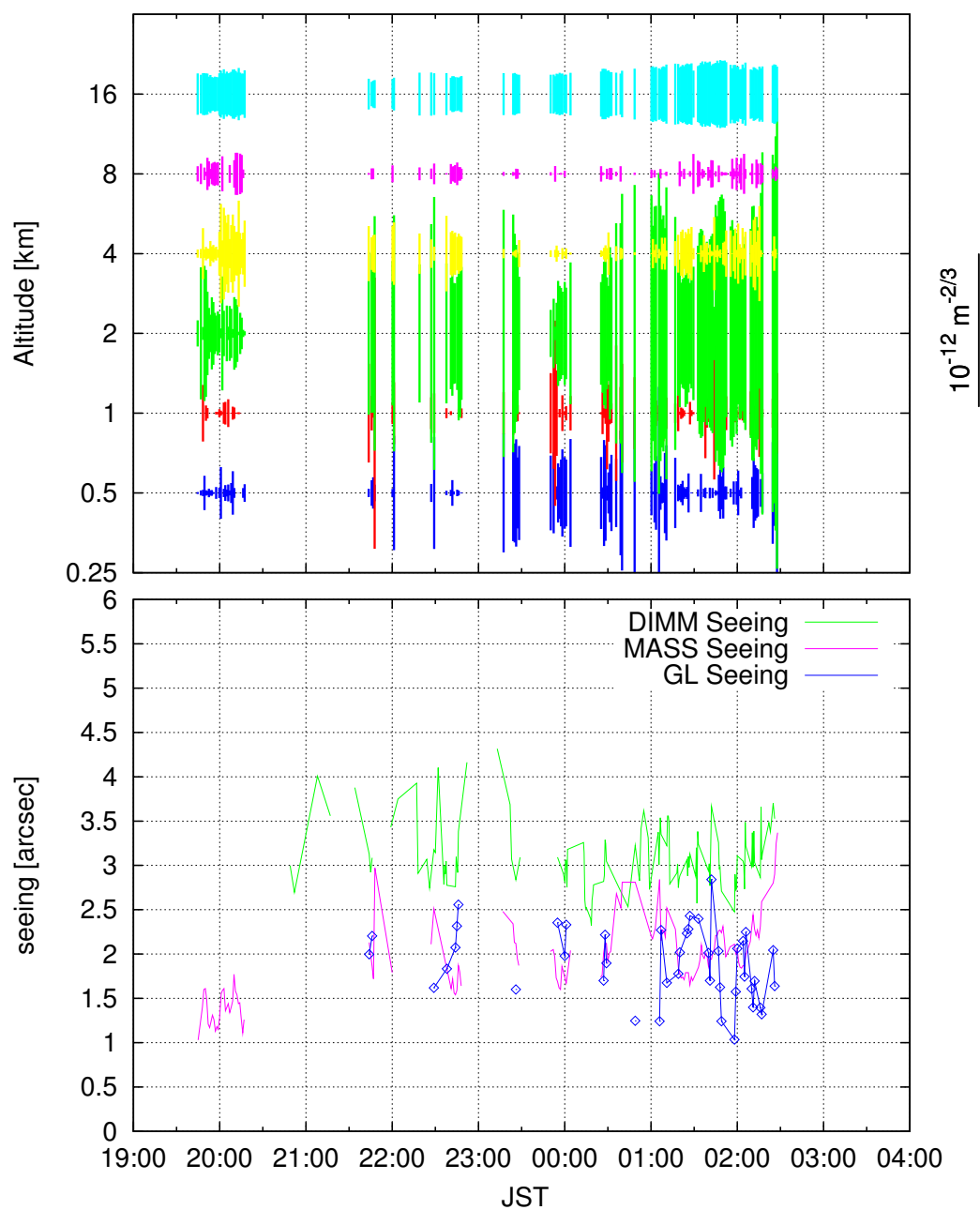


図 4.1: (上)2013年09月17日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5 km, 赤:1 km, 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

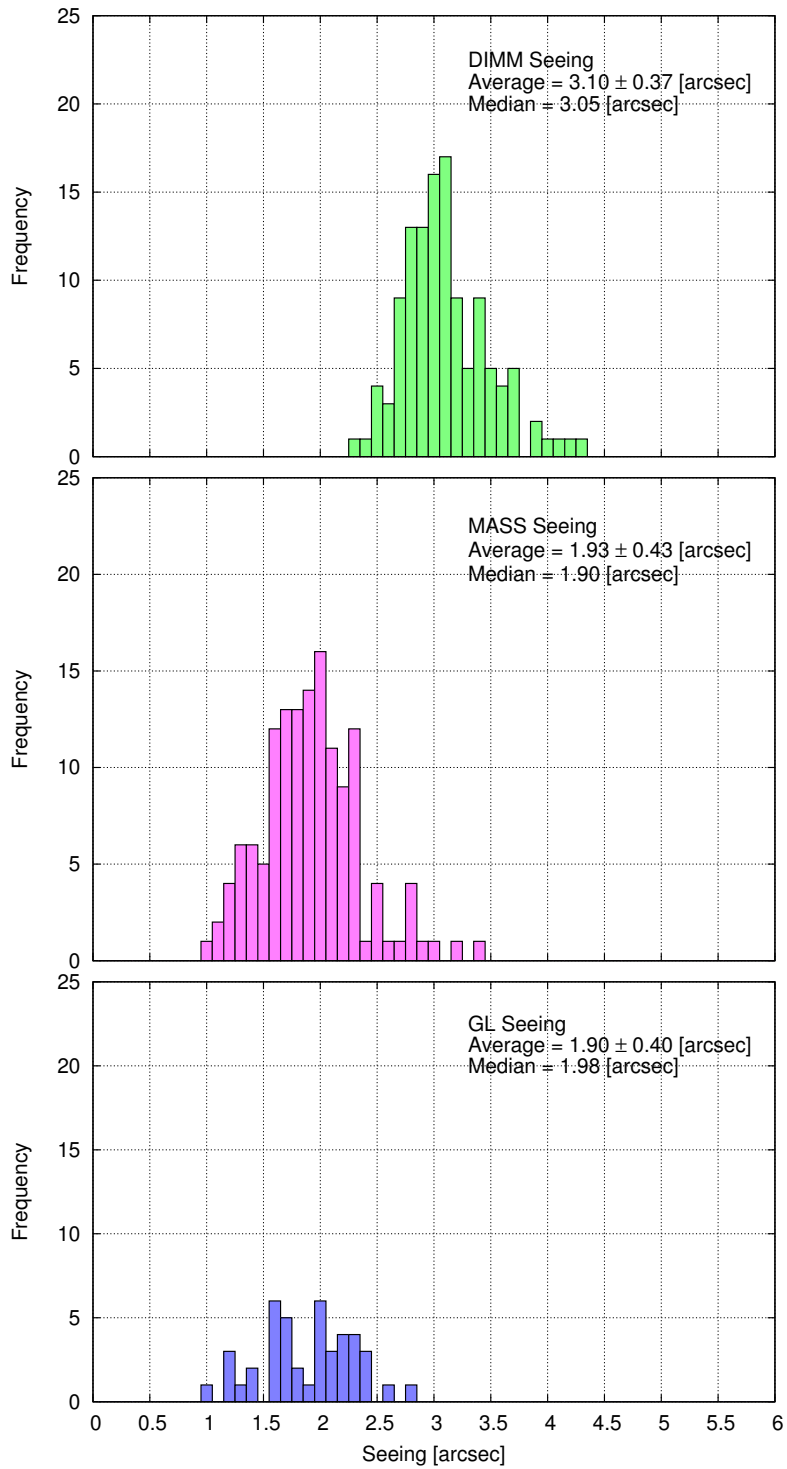


図 4.2: 2013 年 09 月 17 日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

## 4.2 2013年09月18日

21時42分からはくちょう座デネブ(視等級1.25等)、23時29分からぎょしゃ座カペラ(視等級0.08等)を参照星にした。夕方から雲が多く、20時ごろに10分ほど雨が降っていた。21時から晴れ始めたので観測を開始したが、21時40分から厚い雲に覆われたので観測を中止した。23時から少しの時間快晴になったので30分観測を行った。02時30分からわずかに晴れ始めて観測天体が視認できたので、雲の通過が多かったが観測を再開した。

表 4.4: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$2.27 \pm 0.36$	2.24
MASS	$1.73 \pm 0.51$	1.54
GL	$0.87 \pm 0.28$	0.98

表 4.5:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$1.20 \times 10^{-13} \pm 2.86 \times 10^{-14}$	$1.20 \times 10^{-13}$
8	$3.76 \times 10^{-14} \pm 4.06 \times 10^{-14}$	$2.37 \times 10^{-14}$
4	$1.12 \times 10^{-13} \pm 7.13 \times 10^{-14}$	$1.04 \times 10^{-13}$
2	$5.10 \times 10^{-13} \pm 2.64 \times 10^{-13}$	$5.58 \times 10^{-13}$
1	$6.56 \times 10^{-14} \pm 7.20 \times 10^{-14}$	$2.48 \times 10^{-14}$
0.5	$7.95 \times 10^{-13} \pm 7.08 \times 10^{-13}$	$7.20 \times 10^{-13}$

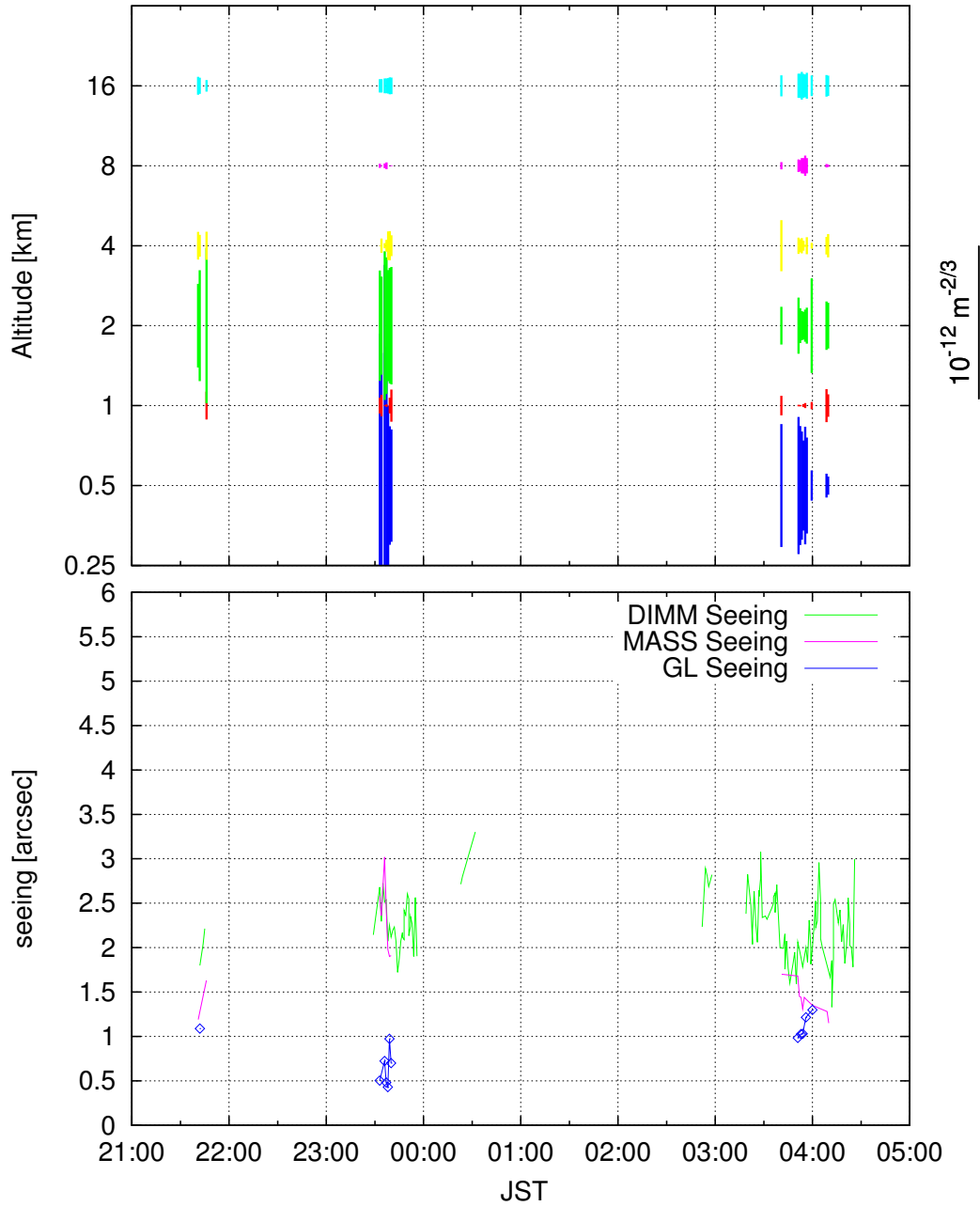


図 4.3: (上)2013年09月18日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

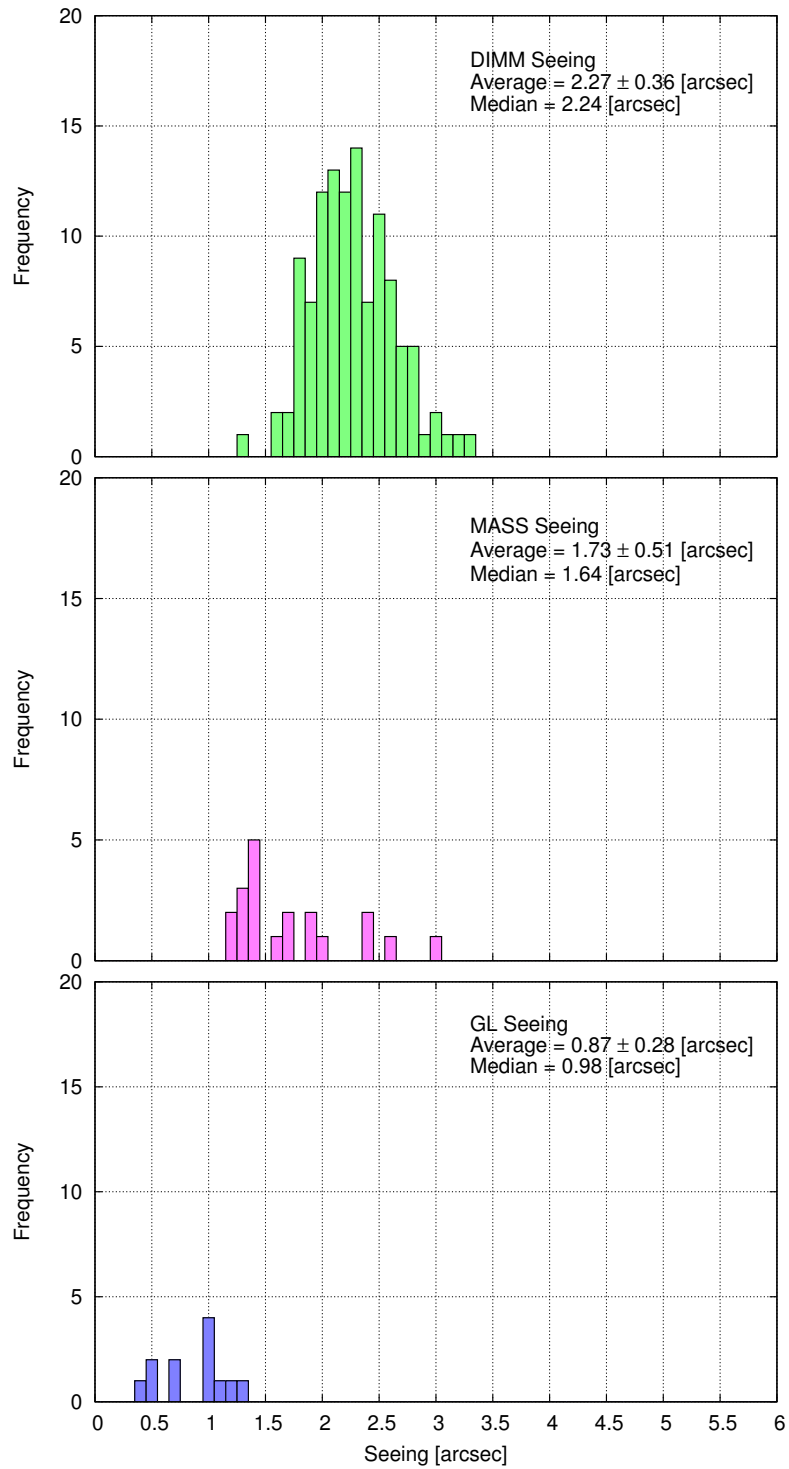


図 4.4: 2013 年 09 月 18 日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

### 4.3 2013年09月19日

18時41分からはくちょう座デネブ(視等級1.25等)を参照星にした。18時30分からデネブが見えていたので観測を開始したが、雲の通過が多かった。21時から厚い雲に覆われて、観測天体が確認できなかったので観測を切り上げた。

表 4.6: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$2.44 \pm 0.33$	2.47
MASS	$0.79 \pm 0.12$	0.76
GL	$2.00 \pm 0.12$	1.97

表 4.7:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-2/3}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-2/3}$ ]
16	$9.97 \times 10^{-14} \pm 2.55 \times 10^{-14}$	$8.95 \times 10^{-14}$
8	$2.23 \times 10^{-14} \pm 2.24 \times 10^{-14}$	$1.54 \times 10^{-14}$
4	$1.23 \times 10^{-13} \pm 7.20 \times 10^{-14}$	$8.54 \times 10^{-14}$
2	$1.48 \times 10^{-13} \pm 6.72 \times 10^{-14}$	$1.42 \times 10^{-13}$
1	$2.09 \times 10^{-14} \pm 3.09 \times 10^{-14}$	$5.86 \times 10^{-15}$
0.5	$3.11 \times 10^{-14} \pm 2.76 \times 10^{-14}$	$2.55 \times 10^{-14}$

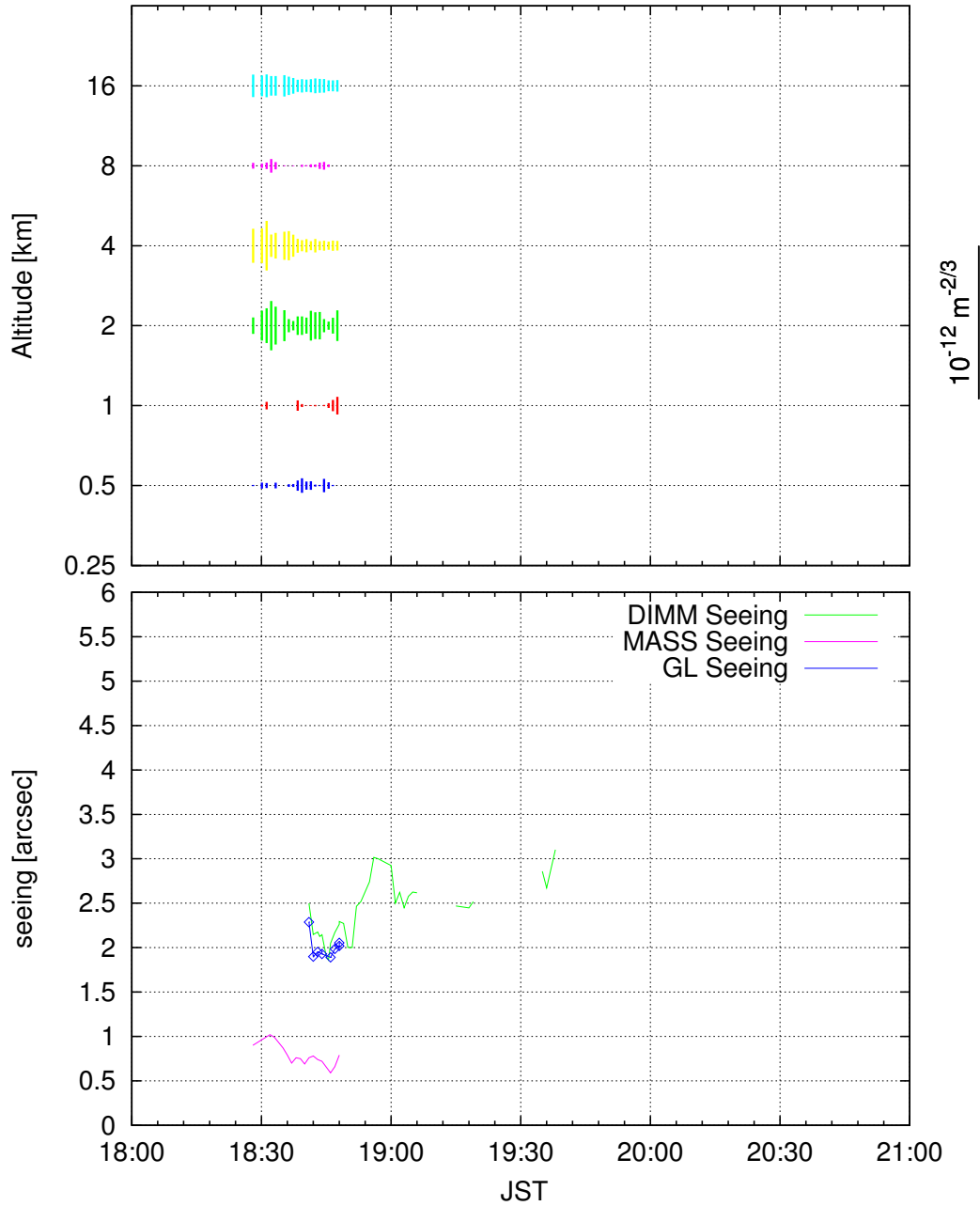


図 4.5: (上)2013 年 09 月 19 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5km, 赤:1km, 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)



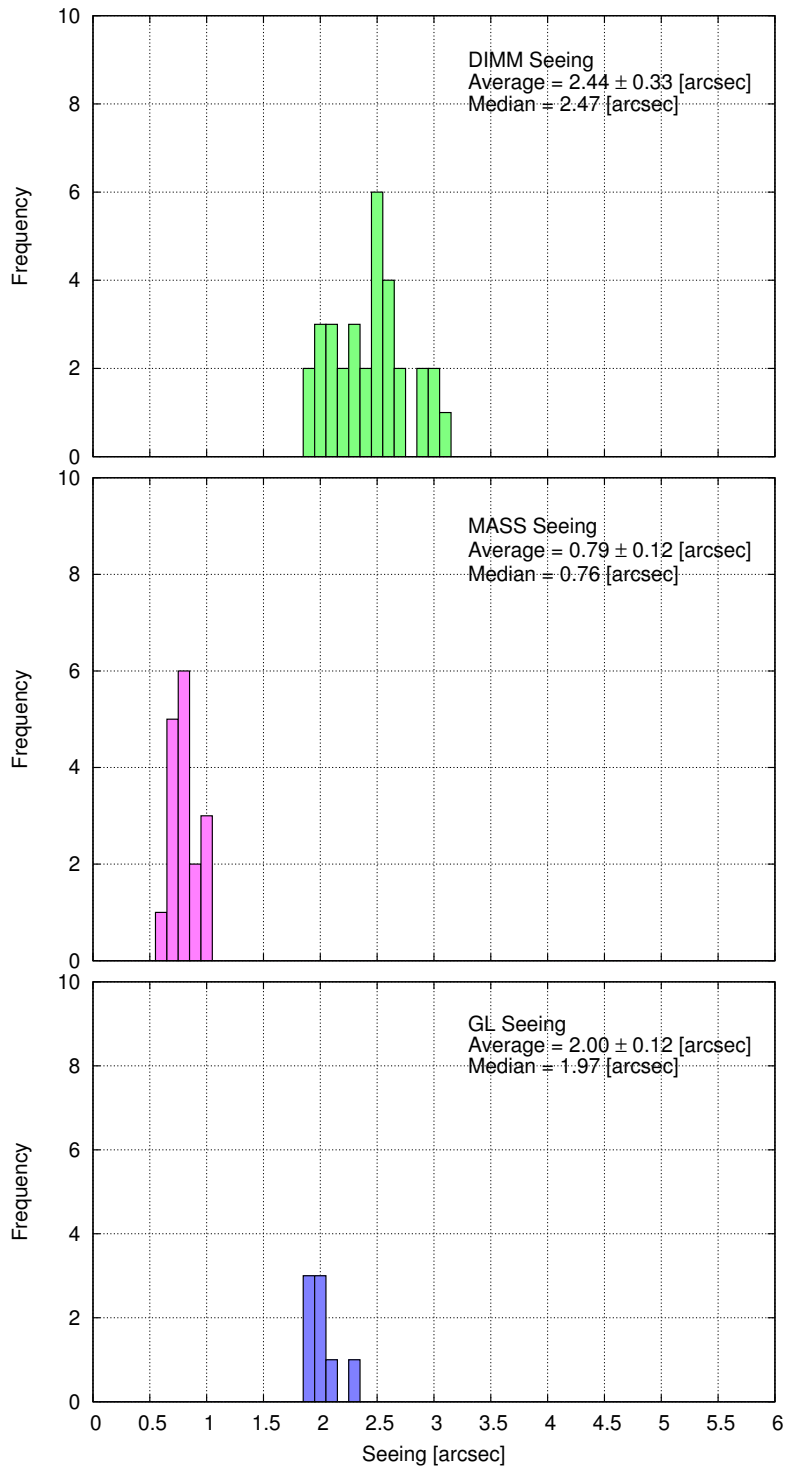


図 4.6: 2013 年 09 月 19 日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.4 2013年09月20日

04時18分からぎよしゃ座カペラ(視等級0.08等)を参照星にした。夕方からあたりが厚い雲に覆われていて、観測ができなかった。23時から数10分ほど雨が降っていた。04時から晴れ始めたので、観測を開始した。04時45分ごろまで観測できたが、雲の通過は多かった。

表 4.8: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$3.33 \pm 0.05$	3.31
MASS	$1.26 \pm 0.30$	1.26
GL	$2.67 \pm 0.00$	2.67

表 4.9:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$2.67 \times 10^{-14} \pm 5.35 \times 10^{-14}$	$2.45 \times 10^{-21}$
8	$2.44 \times 10^{-16} \pm 6.91 \times 10^{-16}$	$1.64 \times 10^{-22}$
4	$6.07 \times 10^{-14} \pm 1.22 \times 10^{-13}$	$2.17 \times 10^{-21}$
2	$1.14 \times 10^{-13} \pm 2.42 \times 10^{-13}$	$1.86 \times 10^{-21}$
1	$1.62 \times 10^{-14} \pm 2.54 \times 10^{-14}$	$3.80 \times 10^{-16}$
0.5	$7.11 \times 10^{-15} \pm 8.93 \times 10^{-15}$	$4.11 \times 10^{-15}$

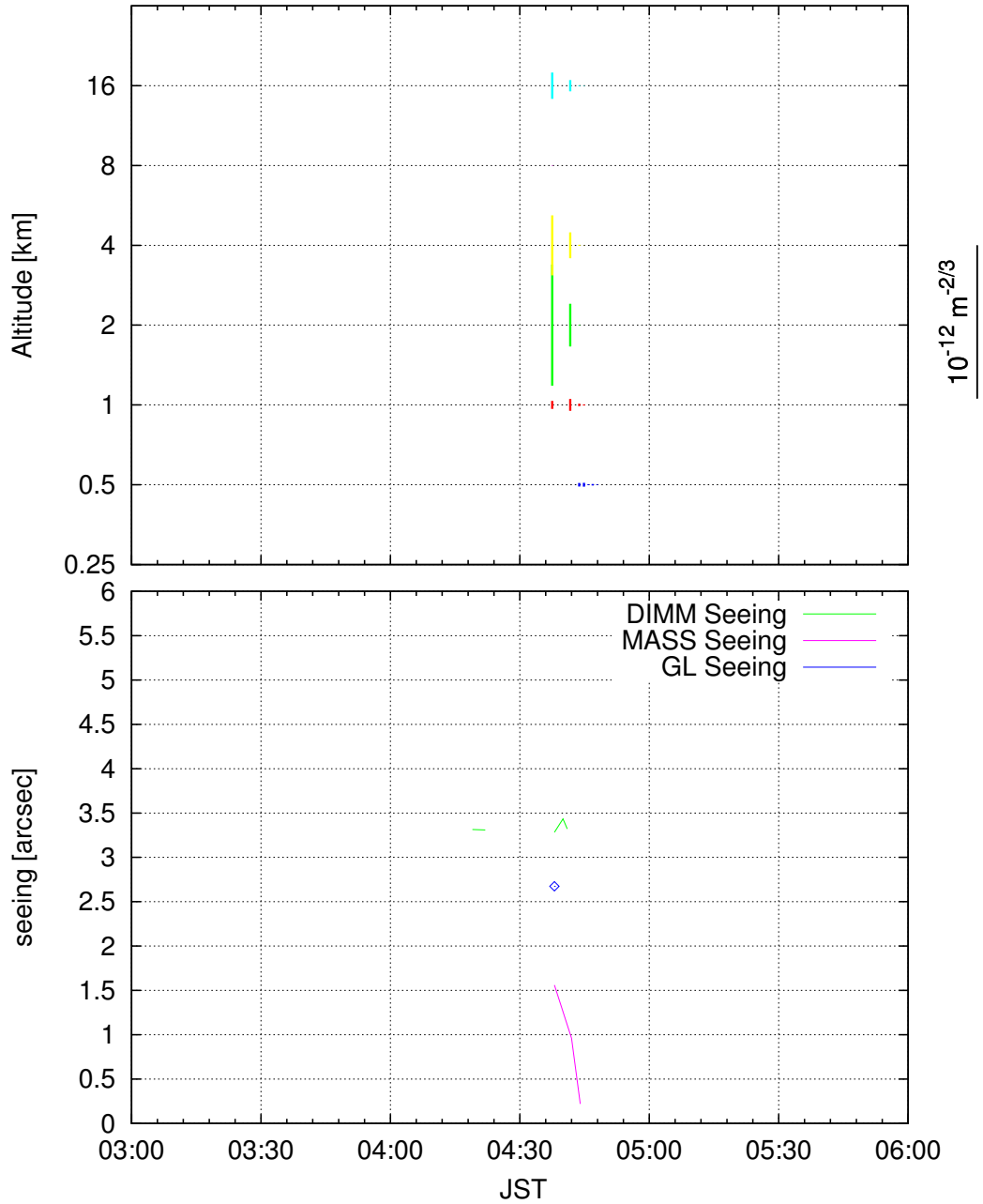


図 4.7: (上)2013 年 09 月 20 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

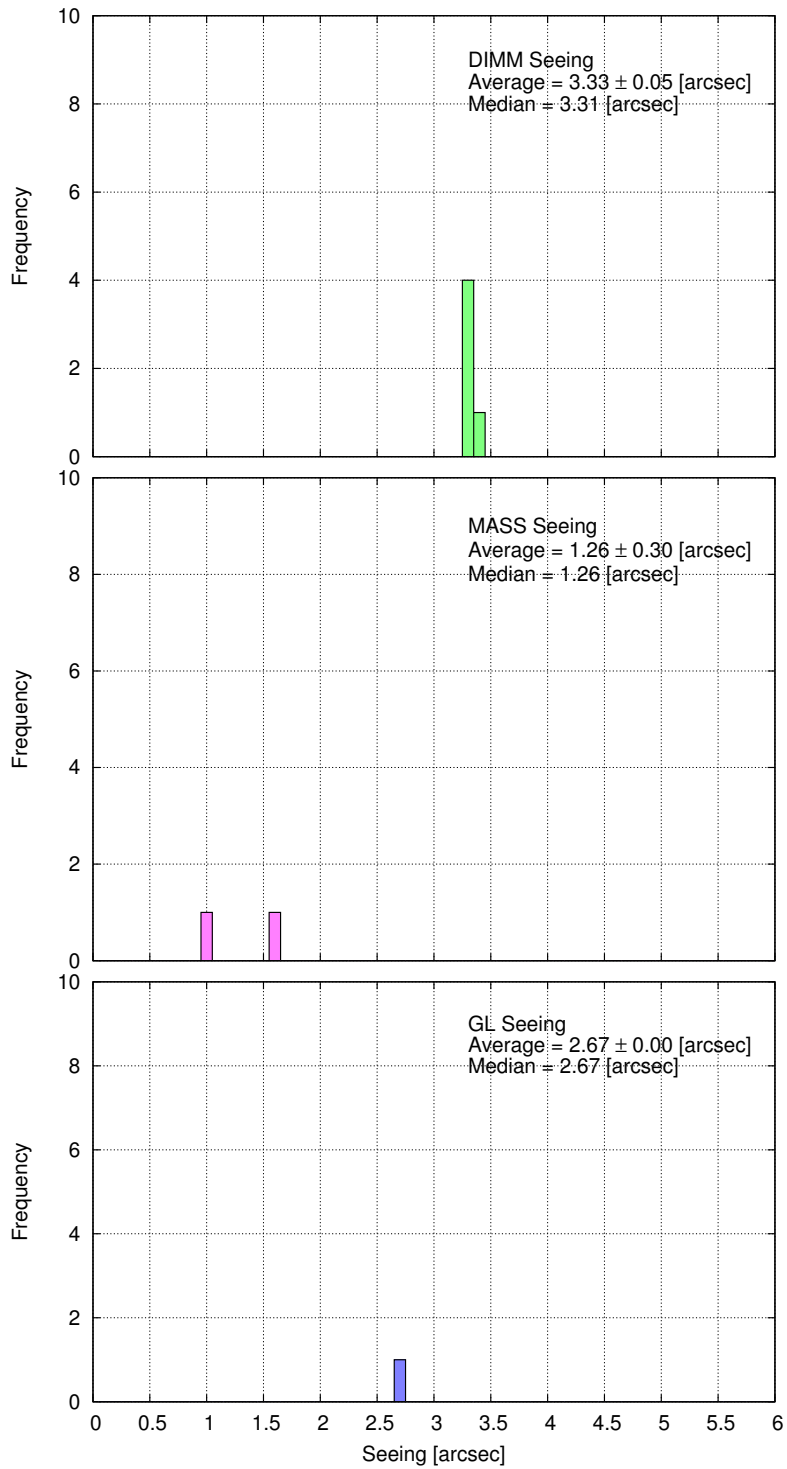


図 4.8: 2013 年 09 月 20 日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.5 2013年09月21日

18時47分からはくちょう座デネブ(視等級1.25等)、0時02分からぎょしゃ座カペラ(視等級0.08等)を参照星にした。18時から21時まで薄い雲に覆われていたが、モニターするには十分な光量であったため測定を行った。その後雲がなくなり快晴になったが、01時30分頃から非常に厚い雲に覆われたので測定を中止した。02時30分から03時頃まで雲が頻繁に通過していたが僅かに対象天体が見えていたので、雲の隙間を狙って測定を続けた。

表 4.10: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$1.41 \pm 0.15$	1.31
	$2.10 \pm 0.27$	2.09
MASS	$0.75 \pm 0.18$	0.72
GL	$1.32 \pm 0.31$	1.25

表 4.11:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$8.38 \times 10^{-14} \pm 1.82 \times 10^{-14}$	$8.00 \times 10^{-14}$
8	$1.38 \times 10^{-14} \pm 1.64 \times 10^{-14}$	$8.20 \times 10^{-15}$
4	$5.70 \times 10^{-14} \pm 4.88 \times 10^{-14}$	$4.28 \times 10^{-14}$
2	$1.86 \times 10^{-13} \pm 1.12 \times 10^{-13}$	$1.65 \times 10^{-13}$
1	$2.87 \times 10^{-14} \pm 4.79 \times 10^{-14}$	$5.07 \times 10^{-15}$
0.5	$1.47 \times 10^{-14} \pm 2.43 \times 10^{-14}$	$2.35 \times 10^{-16}$

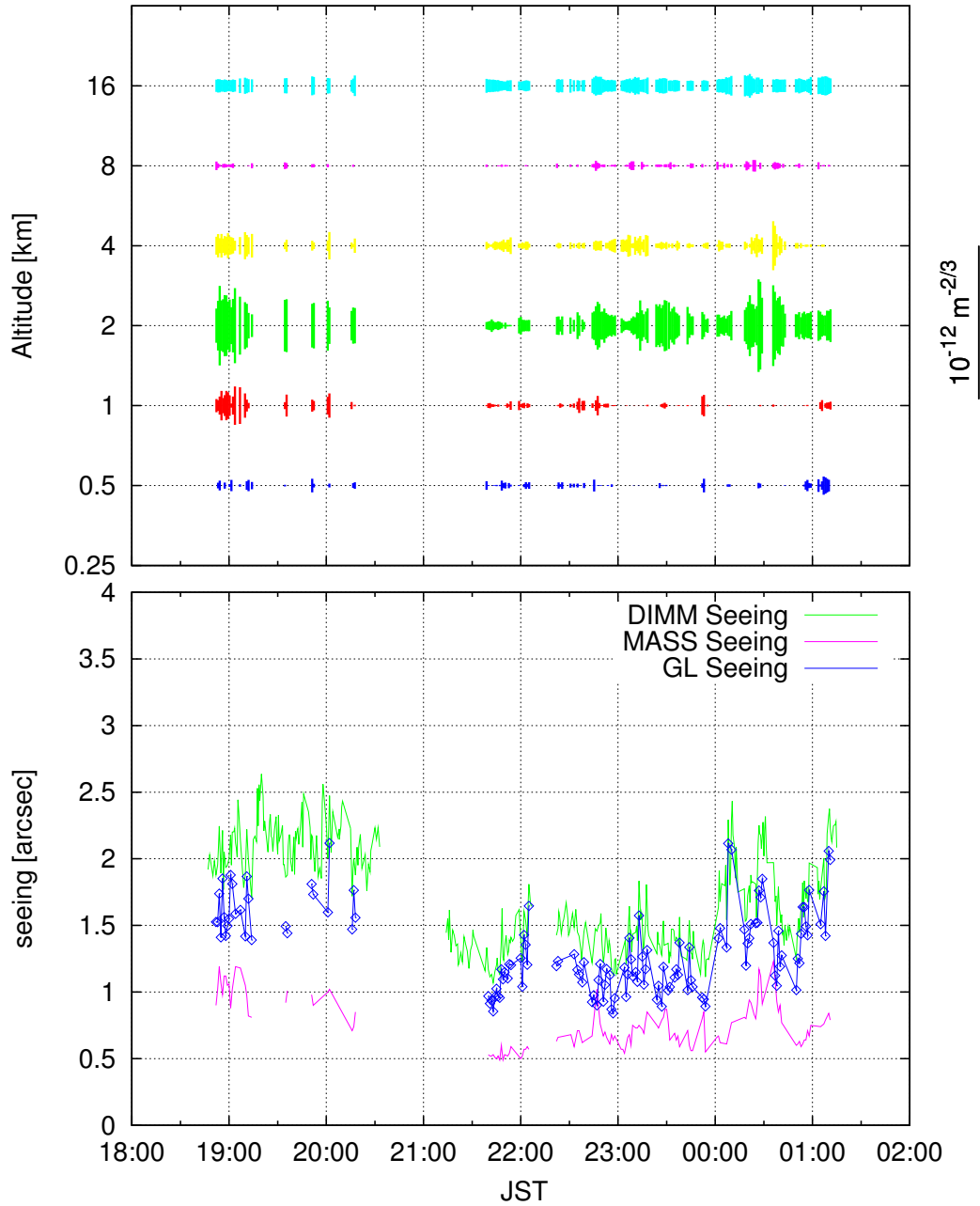


図 4.9: (上)2013 年 09 月 21 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\boxtimes$ , 赤:1  $\boxtimes$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

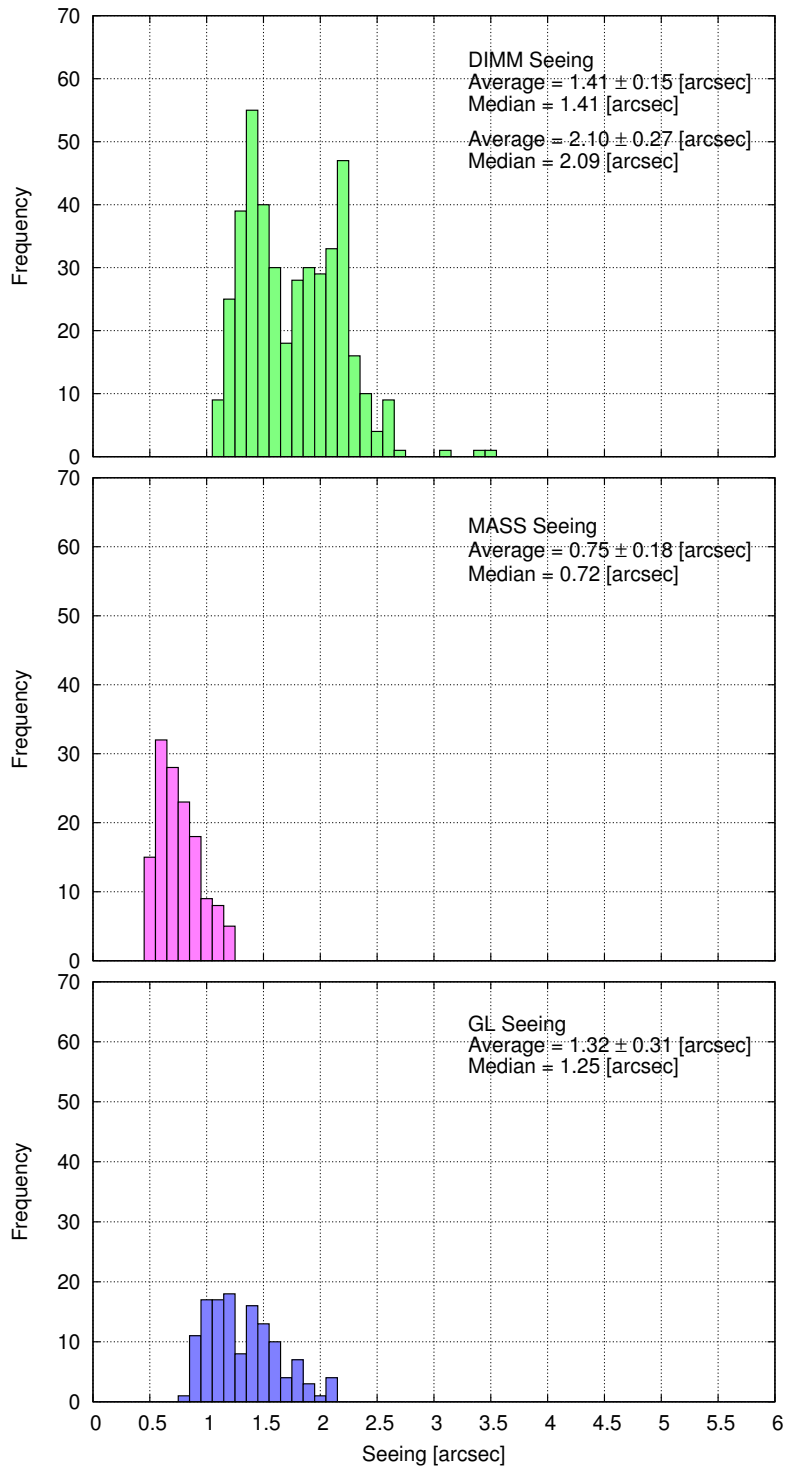


図 4.10: 2013年09月21日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.6 2013年09月22日

18時20分からはくちょう座デネブ(視等級1.25等)、00時28分からぎょしゃ座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。この日は夕方から雲が少なく快晴であった。しかし00時からガスが発生した。ガスは薄く観測天体が視認できたため観測は可能であったが、望遠鏡が結露で濡れてしまうため観測を中止した。04時ごろにわずかにガスがとれたので、10分ほど観測を行った。

表 4.12: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$1.17 \pm 0.13$	1.19
	$2.11 \pm 0.45$	2.06
MASS	$0.51 \pm 0.10$	0.49
	$1.02 \pm 0.19$	0.98
GL	$1.41 \pm 0.52$	1.32

表 4.13:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$1.10 \times 10^{-13} \pm 5.26 \times 10^{-14}$	$1.07 \times 10^{-13}$
8	$6.53 \times 10^{-14} \pm 6.16 \times 10^{-14}$	$4.65 \times 10^{-14}$
4	$1.11 \times 10^{-13} \pm 1.51 \times 10^{-13}$	$3.85 \times 10^{-14}$
2	$3.09 \times 10^{-14} \pm 3.94 \times 10^{-14}$	$1.69 \times 10^{-14}$
1	$4.64 \times 10^{-15} \pm 1.86 \times 10^{-14}$	$1.05 \times 10^{-18}$
0.5	$8.28 \times 10^{-14} \pm 1.17 \times 10^{-13}$	$3.38 \times 10^{-14}$



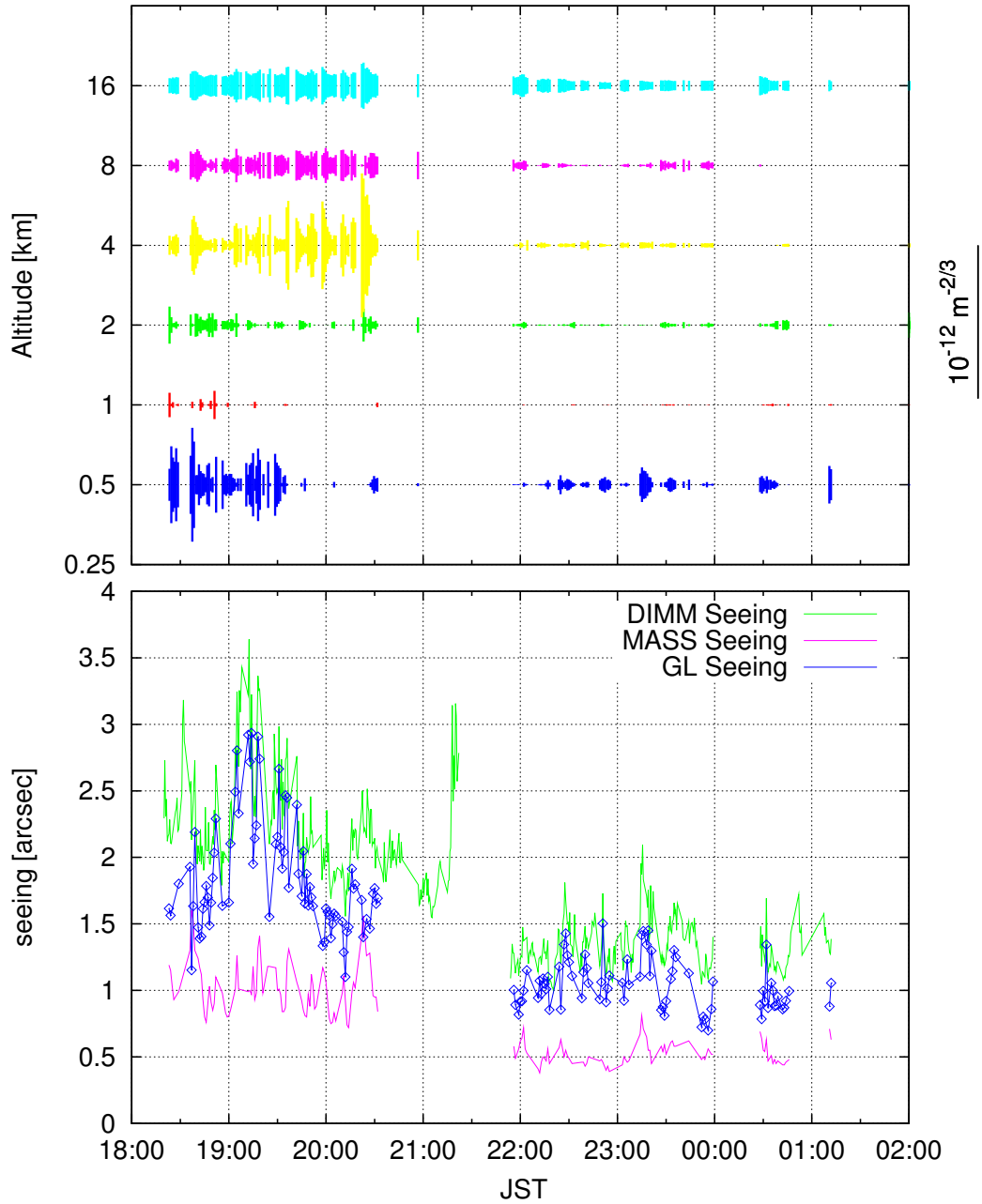


図 4.11: (上)2013 年 09 月 22 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\boxtimes$ , 赤:1  $\boxtimes$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

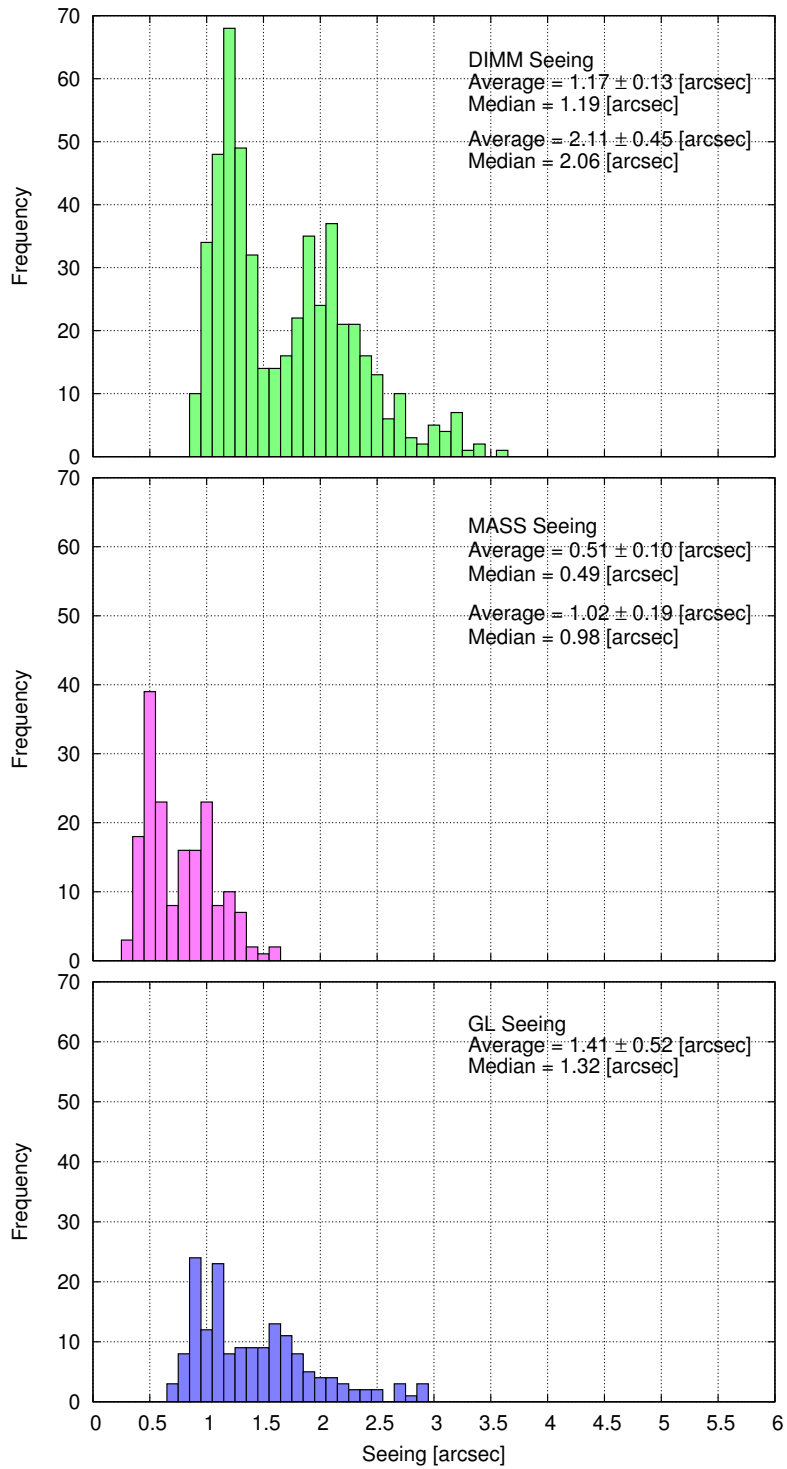


図 4.12: 2013年09月22日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.7 2013年10月16日

03時19分からぎよしや座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。この日はほとんど観測を行えなかった。夕方から雨が降っていた。3時20分から雲がとれて快晴になったので、04時過ぎまで観測を行った。

表 4.14: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$1.86 \pm 0.18$	1.90
MASS	$1.13 \pm 0.04$	1.12
GL	$1.06 \pm 0.11$	1.09

表 4.15:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-2/3}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-2/3}$ ]
16	$1.89 \times 10^{-13} \pm 4.87 \times 10^{-15}$	$1.88 \times 10^{-13}$
8	$5.11 \times 10^{-14} \pm 3.00 \times 10^{-14}$	$6.67 \times 10^{-14}$
4	$5.60 \times 10^{-14} \pm 5.74 \times 10^{-14}$	$3.34 \times 10^{-14}$
2	$4.06 \times 10^{-13} \pm 3.54 \times 10^{-14}$	$3.87 \times 10^{-13}$
1	$4.81 \times 10^{-14} \pm 5.82 \times 10^{-14}$	$7.40 \times 10^{-15}$
0.5	$9.37 \times 10^{-15} \pm 1.02 \times 10^{-14}$	$7.84 \times 10^{-15}$

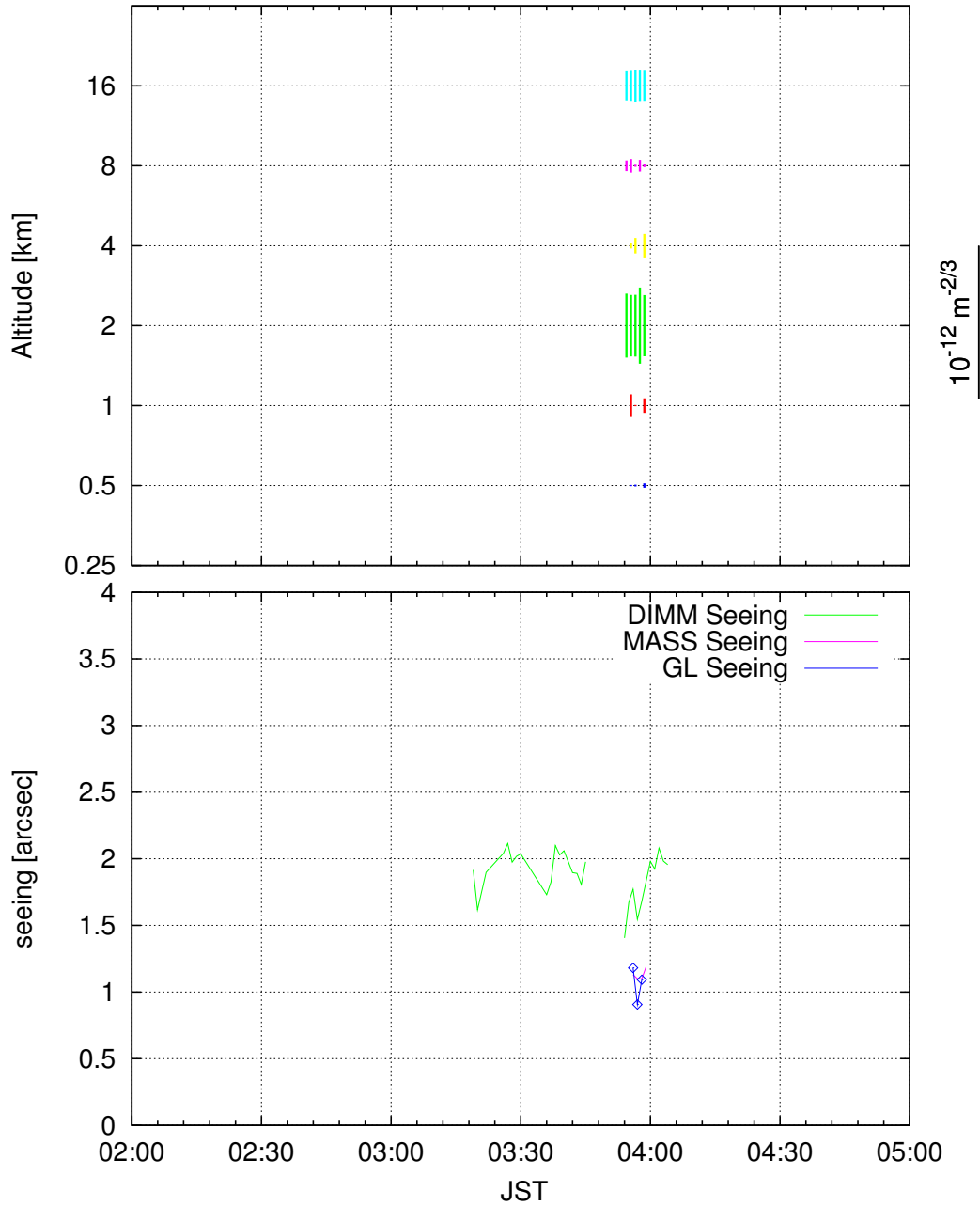


図 4.13: (上)2013 年 10 月 16 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

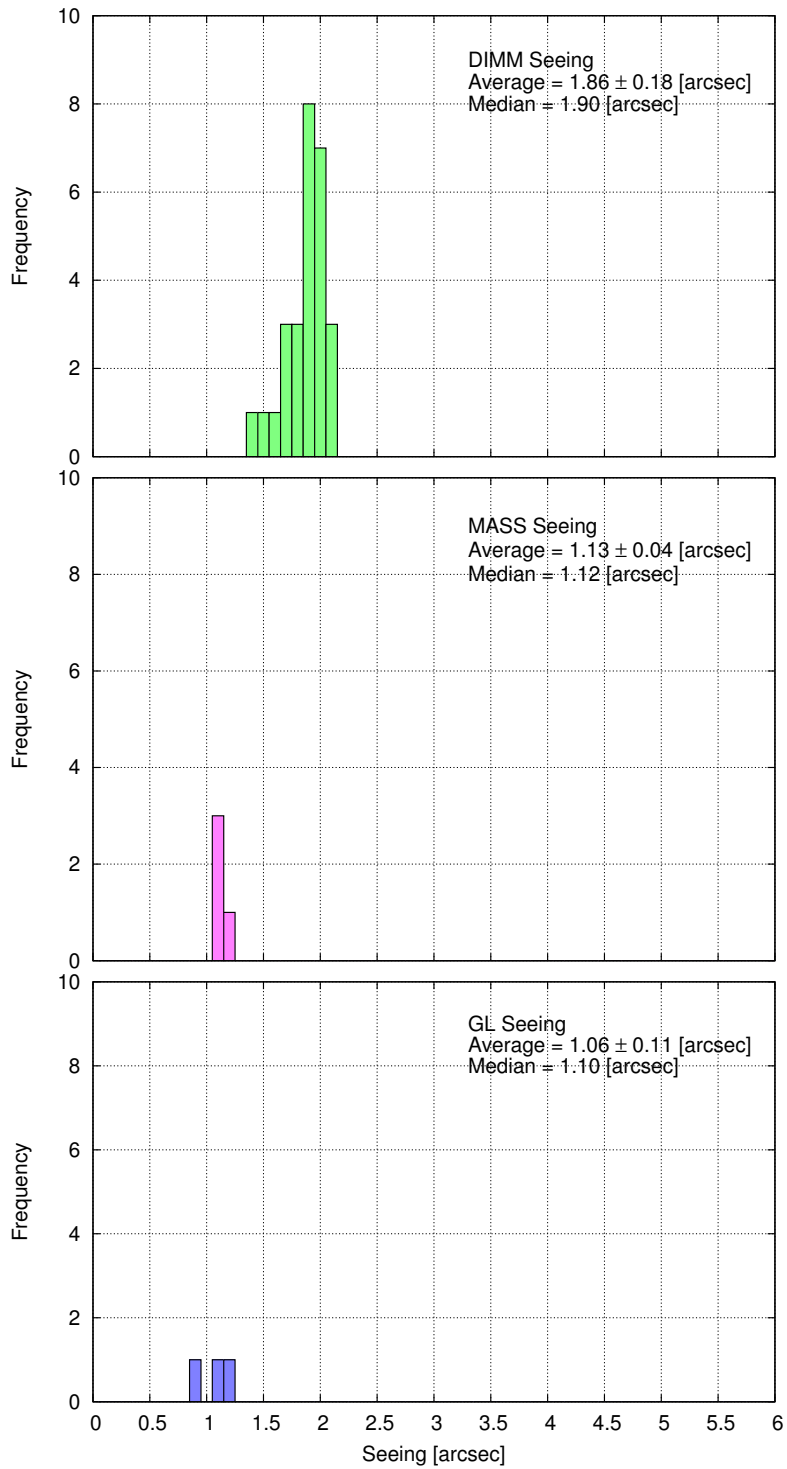


図 4.14: 2013 年 10 月 16 日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.8 2013年10月17日

03時58分からぎよしや座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。この日は夕方頃には少し晴れていたが、赤道儀の電源ケーブルが断線してしまい修理に時間を要した。その後雲が厚く観測天体が確認できなかったが、04時から快晴になったので、薄明まで観測を行うことができた。

表 4.16: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$2.00 \pm 0.32$	2.02
MASS	$1.01 \pm 0.42$	0.87
GL	$1.50 \pm 0.23$	1.56

表 4.17:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$5.82 \times 10^{-14} \pm 1.33 \times 10^{-14}$	$5.40 \times 10^{-14}$
8	$6.21 \times 10^{-15} \pm 1.54 \times 10^{-14}$	$6.88 \times 10^{-22}$
4	$1.64 \times 10^{-14} \pm 1.86 \times 10^{-14}$	$8.25 \times 10^{-15}$
2	$2.05 \times 10^{-13} \pm 8.05 \times 10^{-14}$	$1.98 \times 10^{-13}$
1	$4.78 \times 10^{-14} \pm 3.95 \times 10^{-14}$	$4.04 \times 10^{-14}$
0.5	$3.99 \times 10^{-13} \pm 4.71 \times 10^{-13}$	$1.49 \times 10^{-13}$

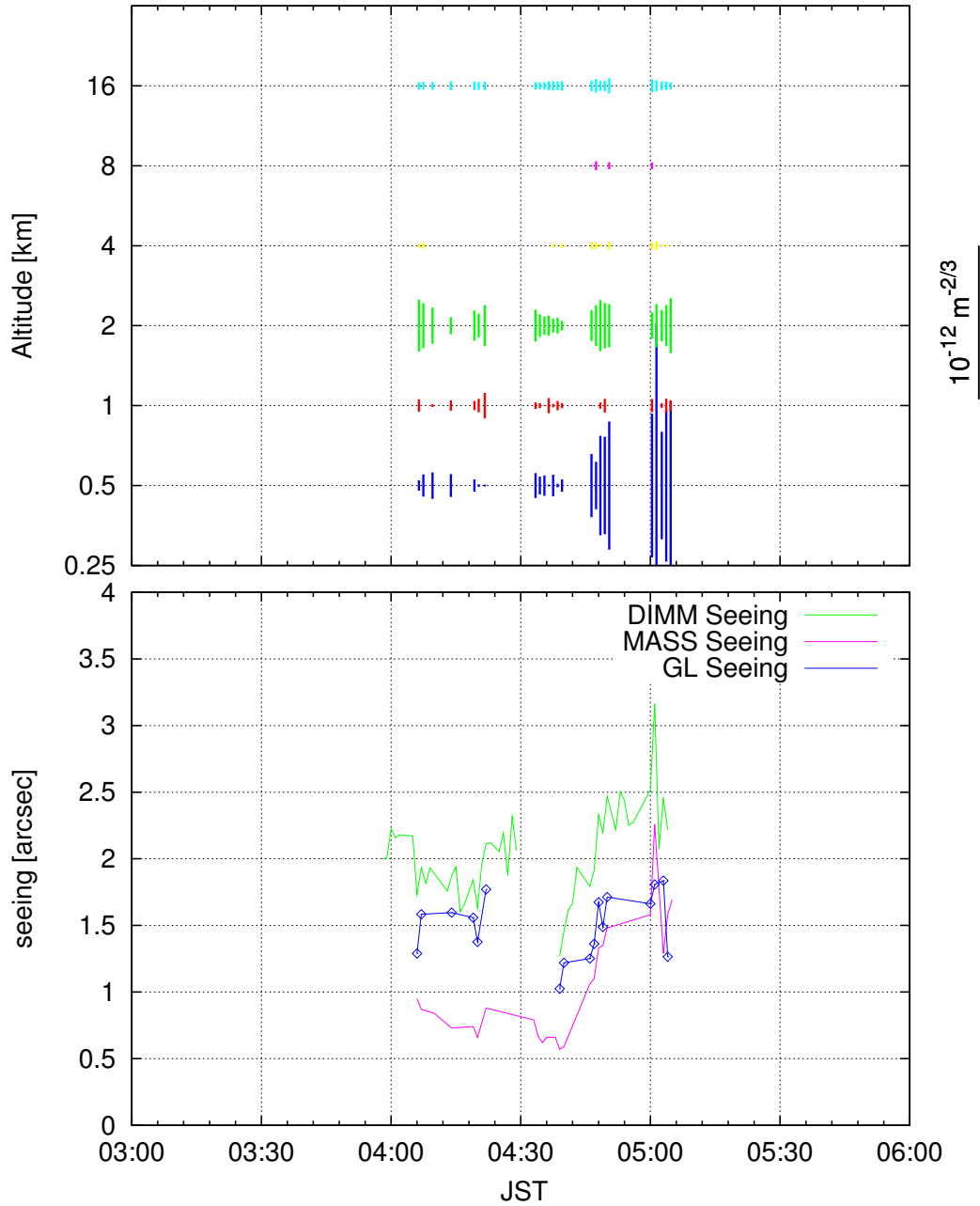


図 4.15: (上)2013 年 10 月 17 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

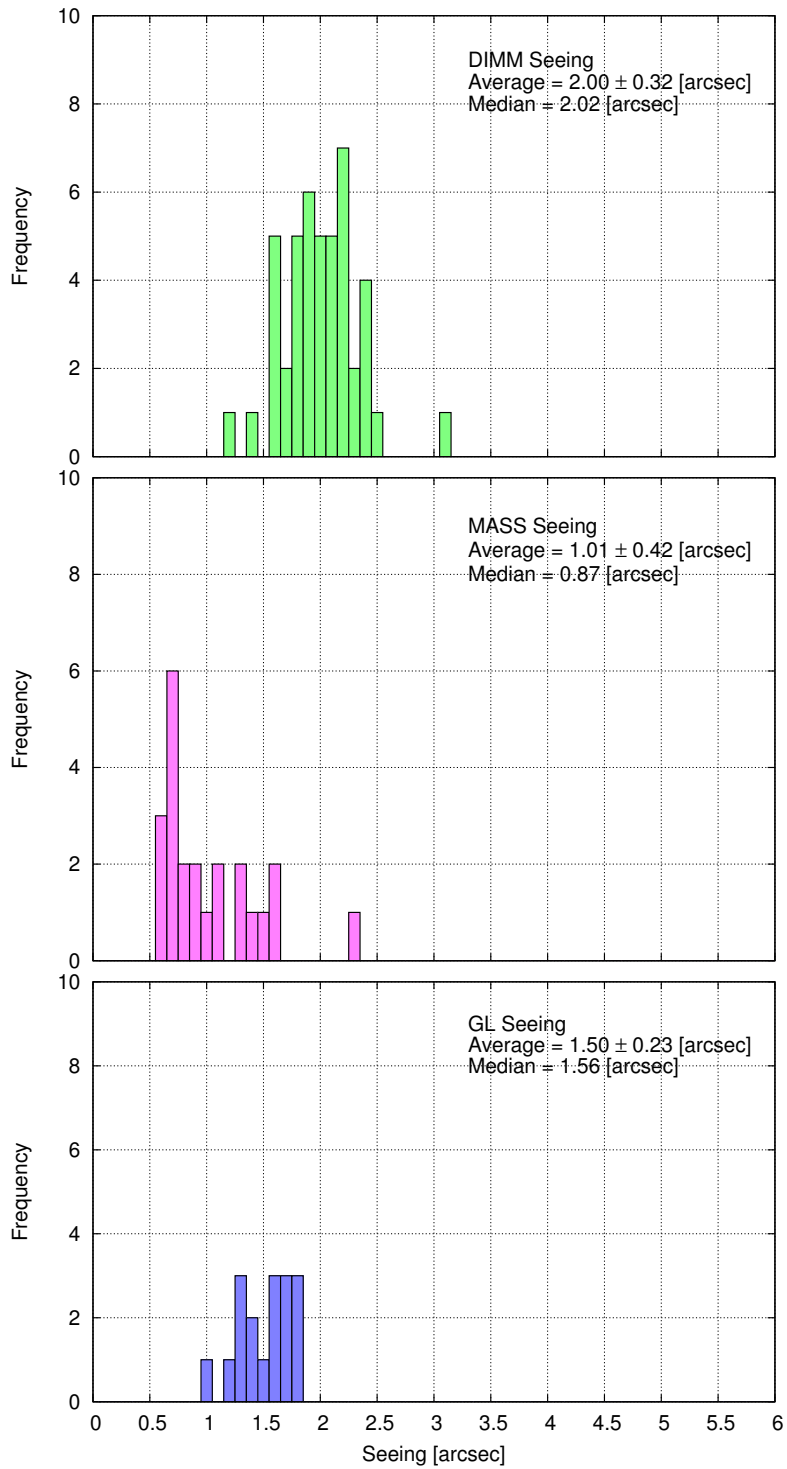


図 4.16: 2013年10月17日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング



#### 4.9 2013年10月18日

19時34分からはくちょう座デネブ(視等級1.25等)、23時26分からぎょしゃ座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。この日はよく晴れていたため、長時間の観測を行うことができた。夕方から01時30分まで雲のない快晴であったが、その後朝までガスが発生している。それほど濃いガスではなかったので観測は続けているが、ガスが濃くなる時間は観測を一時中断している。

表 4.18: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$1.80 \pm 0.40$	1.74
MASS	$0.72 \pm 0.28$	0.65
GL	$1.59 \pm 0.43$	1.54

表 4.19:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$4.80 \times 10^{-14} \pm 1.62 \times 10^{-14}$	$4.36 \times 10^{-14}$
8	$8.08 \times 10^{-18} \pm 8.63 \times 10^{-17}$	$3.19 \times 10^{-22}$
4	$1.22 \times 10^{-15} \pm 4.34 \times 10^{-15}$	$4.97 \times 10^{-22}$
2	$3.14 \times 10^{-14} \pm 3.62 \times 10^{-14}$	$2.22 \times 10^{-14}$
1	$1.06 \times 10^{-14} \pm 1.73 \times 10^{-14}$	$4.17 \times 10^{-15}$
0.5	$2.69 \times 10^{-13} \pm 2.62 \times 10^{-13}$	$1.72 \times 10^{-13}$

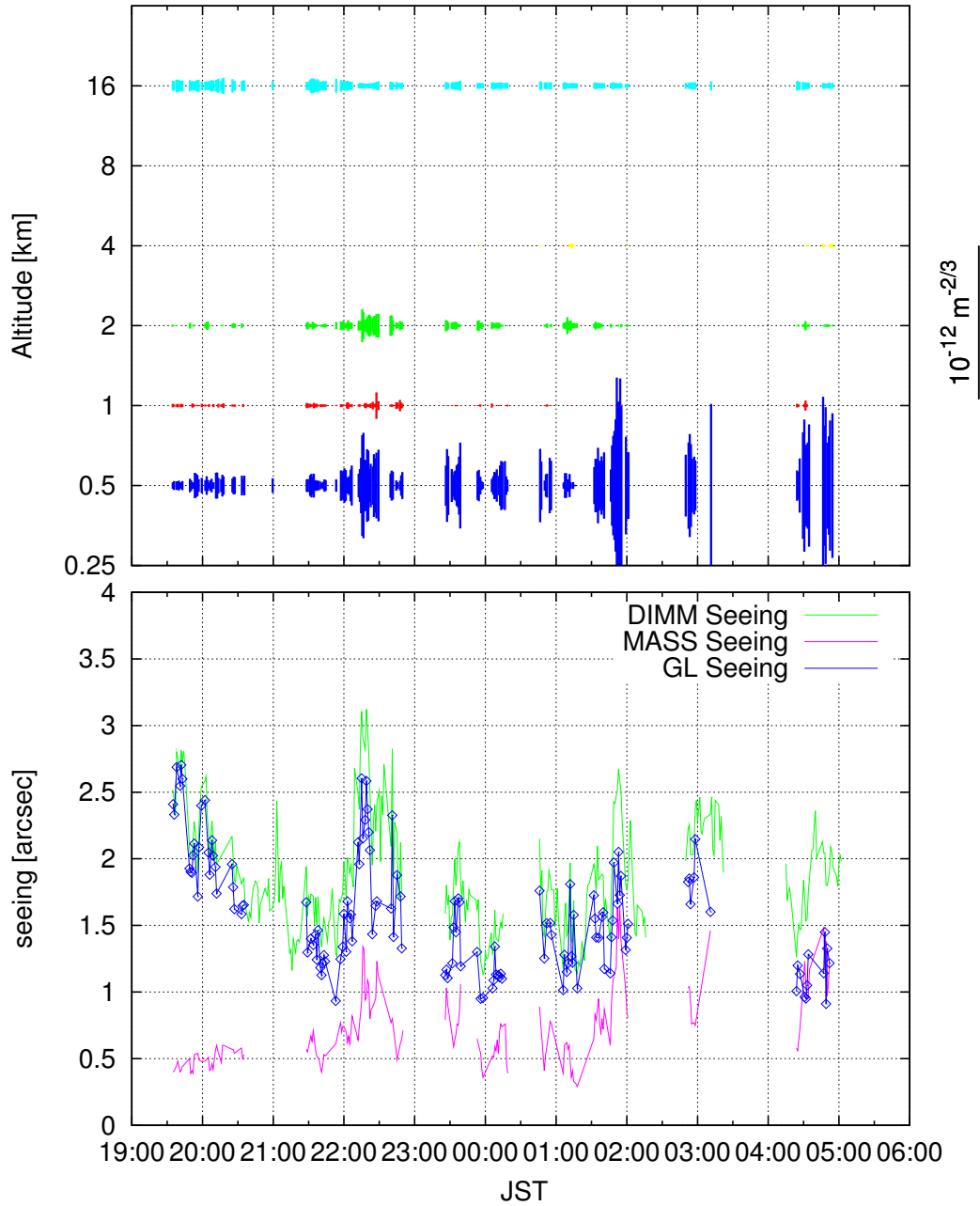


図 4.17: (上)2013 年 10 月 18 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

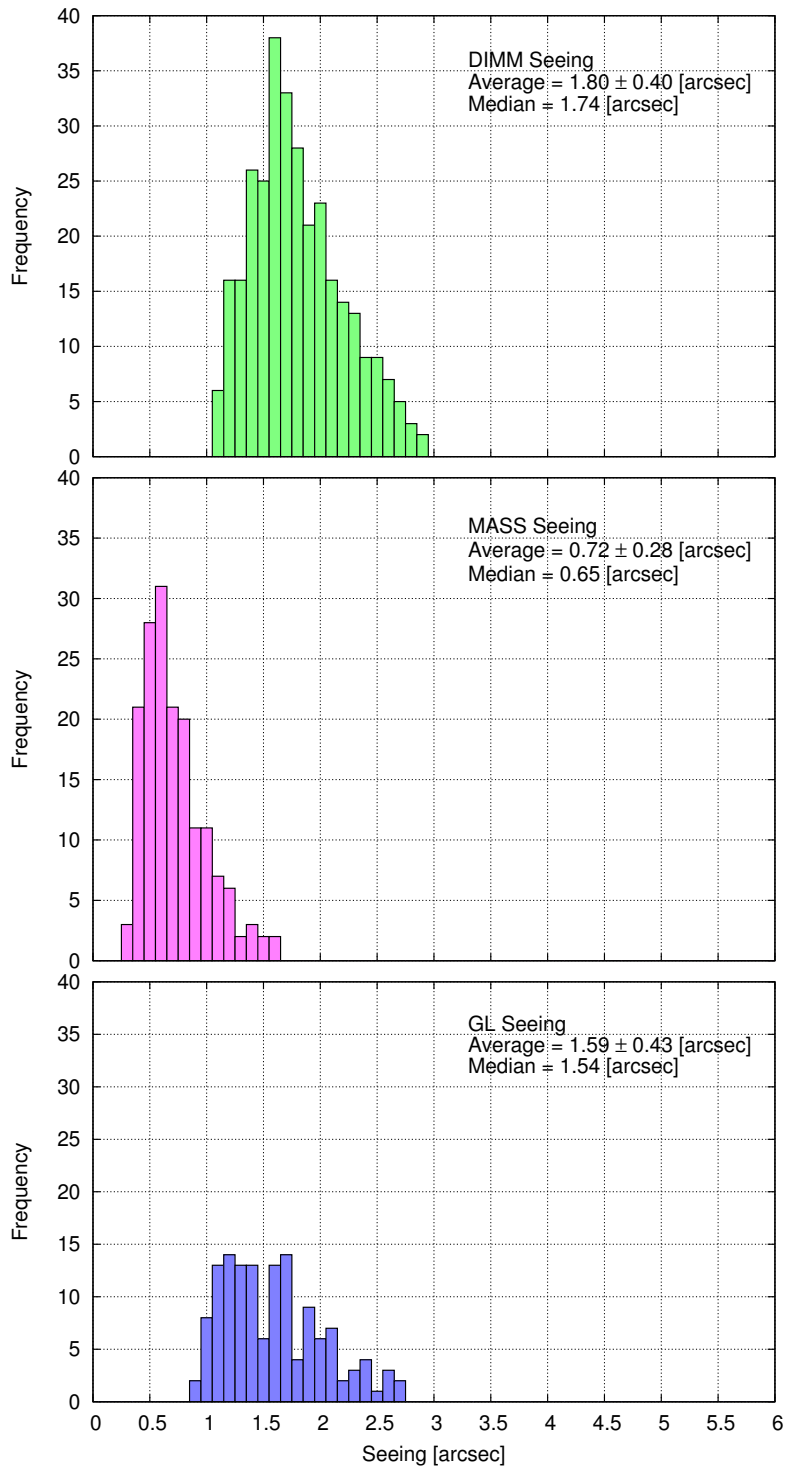


図 4.18: 2013年10月18日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.10 2013年10月19日

19時35分からはくちょう座デネブ(視等級1.25等)、22時57分からぎょしゃ座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。この日は特に大きな雲はなく、安定してデータがとれた。しかし00時00分から濃いガスが発生したので、観測を一時中止した。01時からガスが薄くなったので観測を再開したが、03時から再び濃くなり、観測天体が見えなくなったので観測を終了した。

表 4.20: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$1.65 \pm 0.33$	1.59
MASS	$0.66 \pm 0.23$	0.62
GL	$1.47 \pm 0.34$	1.37

表 4.21:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$4.34 \times 10^{-14} \pm 1.41 \times 10^{-14}$	$4.26 \times 10^{-14}$
8	$1.54 \times 10^{-16} \pm 9.22 \times 10^{-16}$	$4.64 \times 10^{-22}$
4	$3.29 \times 10^{-15} \pm 9.02 \times 10^{-15}$	$7.03 \times 10^{-22}$
2	$1.64 \times 10^{-14} \pm 2.02 \times 10^{-14}$	$1.24 \times 10^{-14}$
1	$2.99 \times 10^{-14} \pm 6.74 \times 10^{-14}$	$9.06 \times 10^{-15}$
0.5	$2.11 \times 10^{-13} \pm 1.53 \times 10^{-13}$	$1.69 \times 10^{-13}$

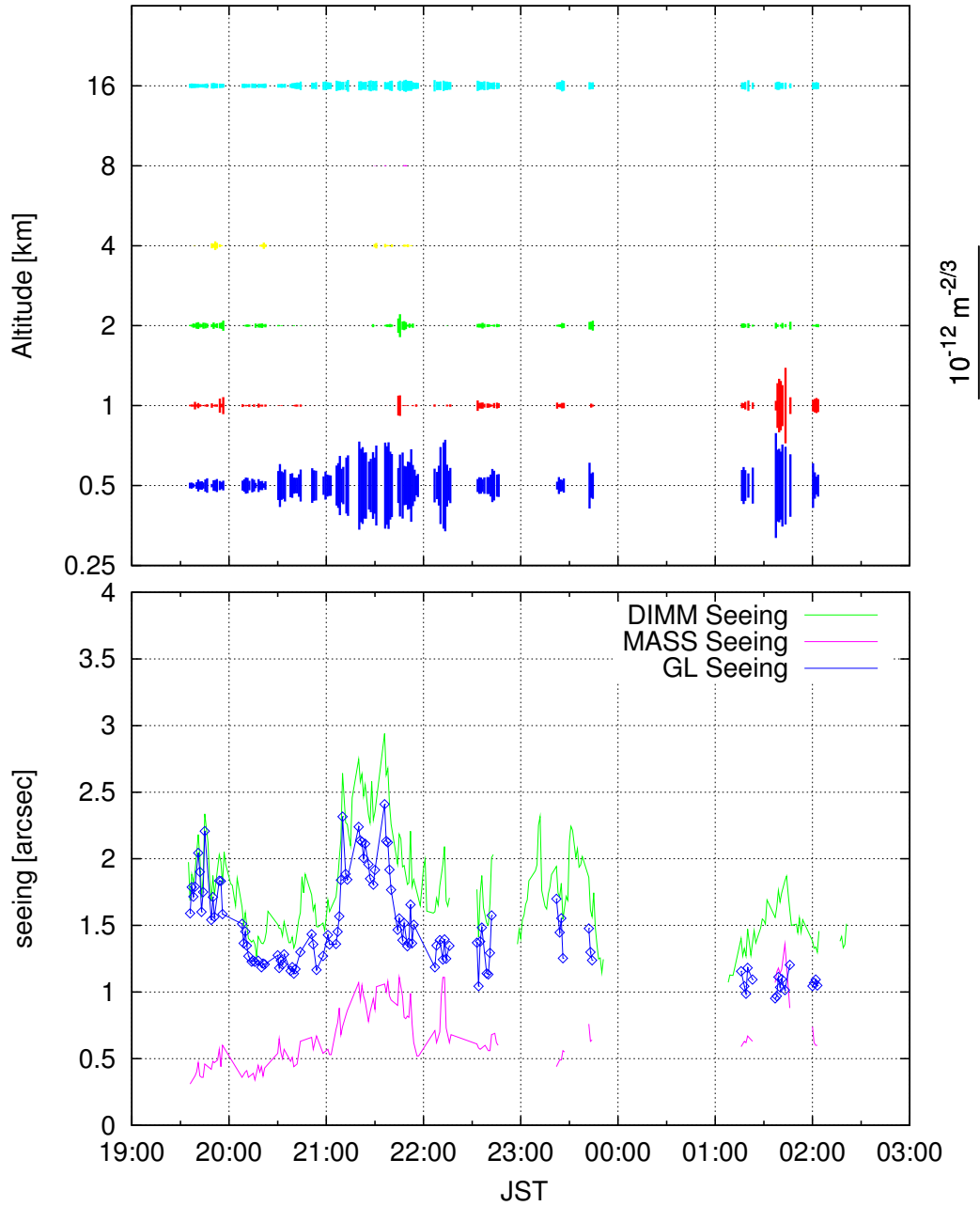


図 4.19: (上)2013 年 10 月 19 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\boxtimes$ , 赤:1  $\boxtimes$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

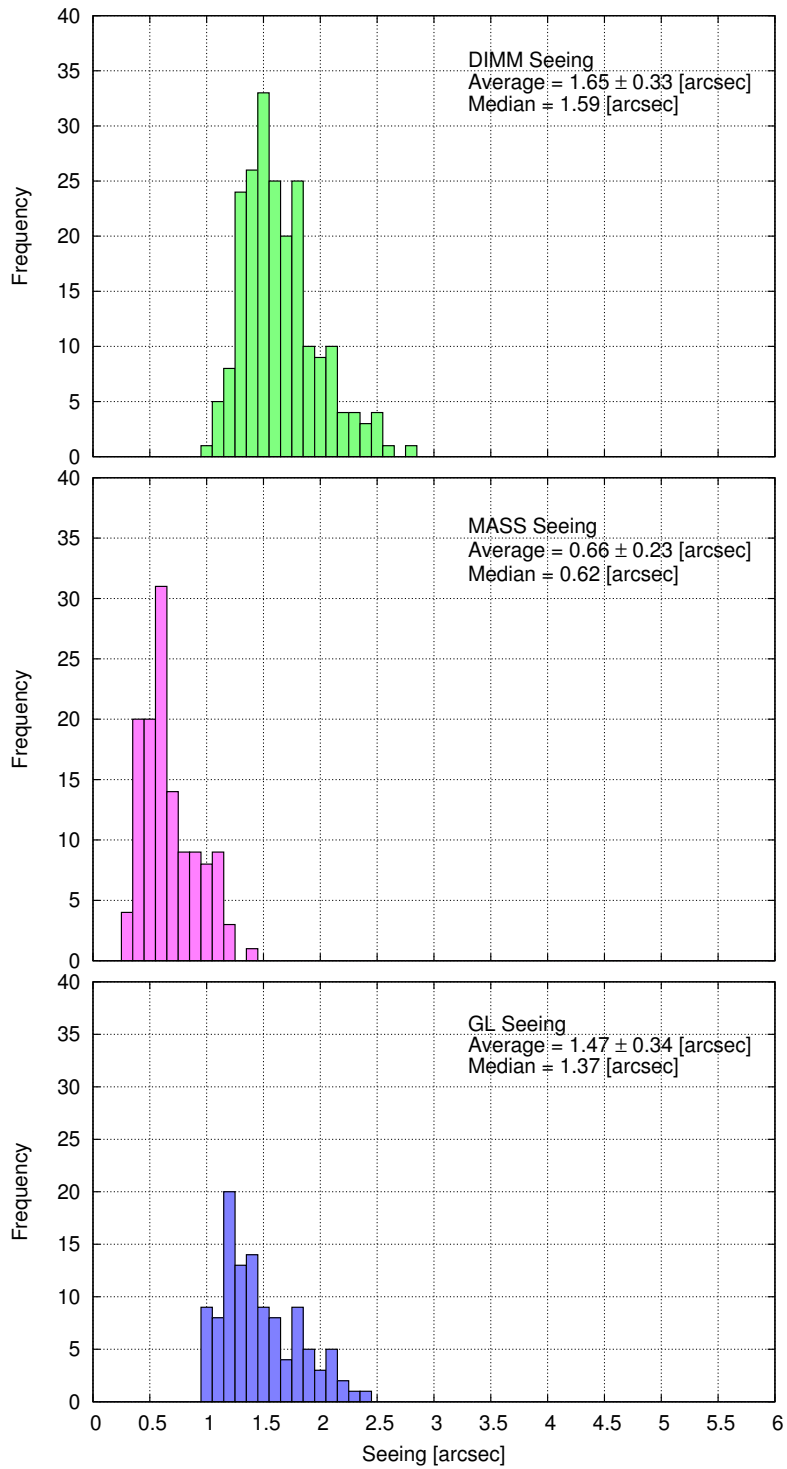


図 4.20: 2013 年 10 月 19 日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.11 2013年10月21日

01時09分からぎよしゃ座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。この日はほとんど観測を行えなかった。夕方から00時過ぎまでは厚い雲で覆われていた。その後雲がほぼなくなり快晴になったので観測を開始したが、02時から観測天体が雲に完全に隠れてしまった。

表 4.22: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$3.16 \pm 0.43$	3.17
MASS	$3.11 \pm 0.25$	3.05
GL	$1.57 \pm 0.86$	1.57

表 4.23:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$9.93 \times 10^{-14} \pm 2.63 \times 10^{-14}$	$1.00 \times 10^{-13}$
8	$1.70 \times 10^{-14} \pm 1.72 \times 10^{-14}$	$1.19 \times 10^{-14}$
4	$1.68 \times 10^{-13} \pm 4.32 \times 10^{-14}$	$1.73 \times 10^{-13}$
2	$9.12 \times 10^{-13} \pm 1.63 \times 10^{-13}$	$9.71 \times 10^{-13}$
1	$7.37 \times 10^{-13} \pm 2.06 \times 10^{-13}$	$7.57 \times 10^{-13}$
0.5	$2.53 \times 10^{-12} \pm 5.73 \times 10^{-13}$	$2.40 \times 10^{-12}$

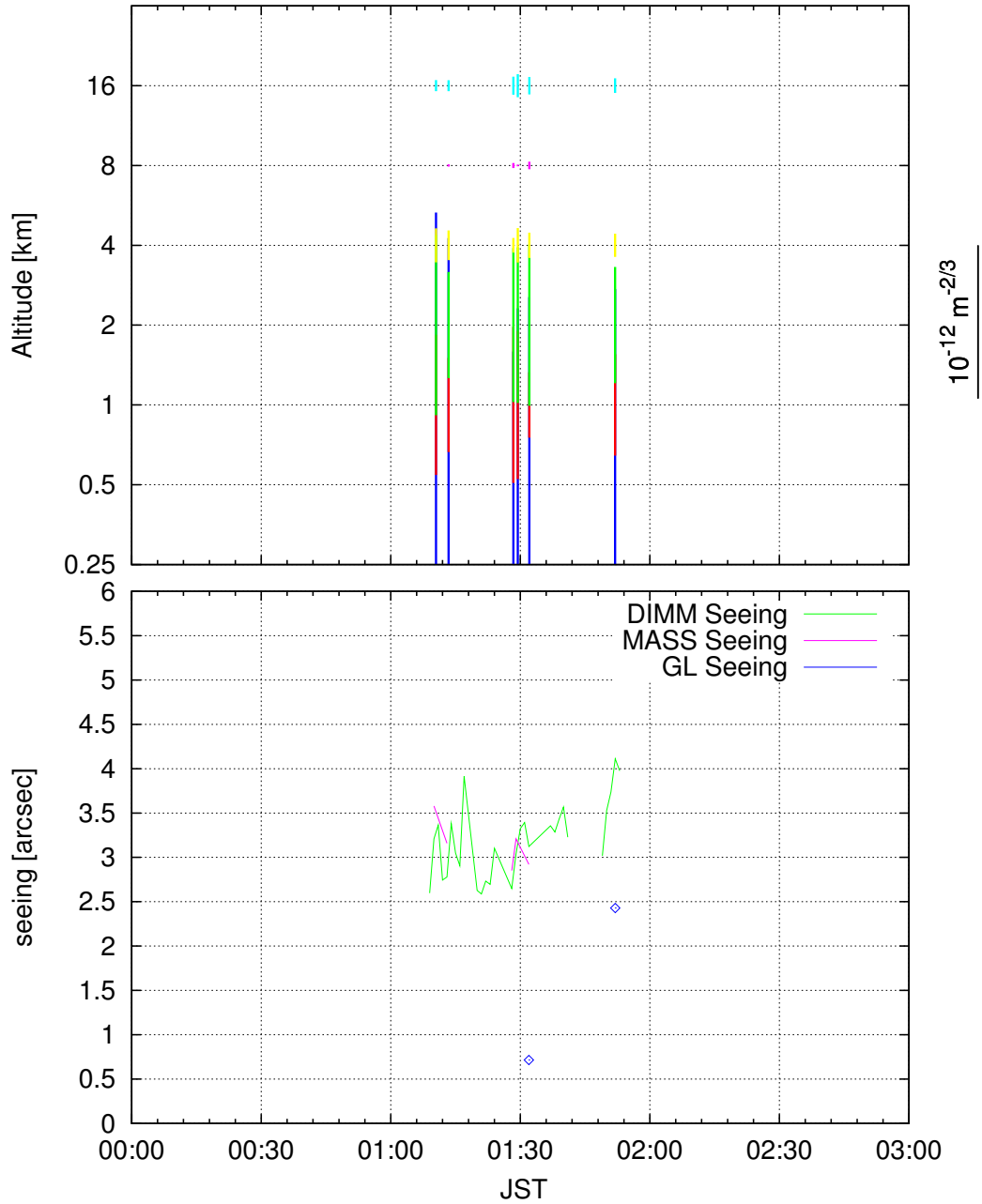


図 4.21: (上)2013 年 10 月 21 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)



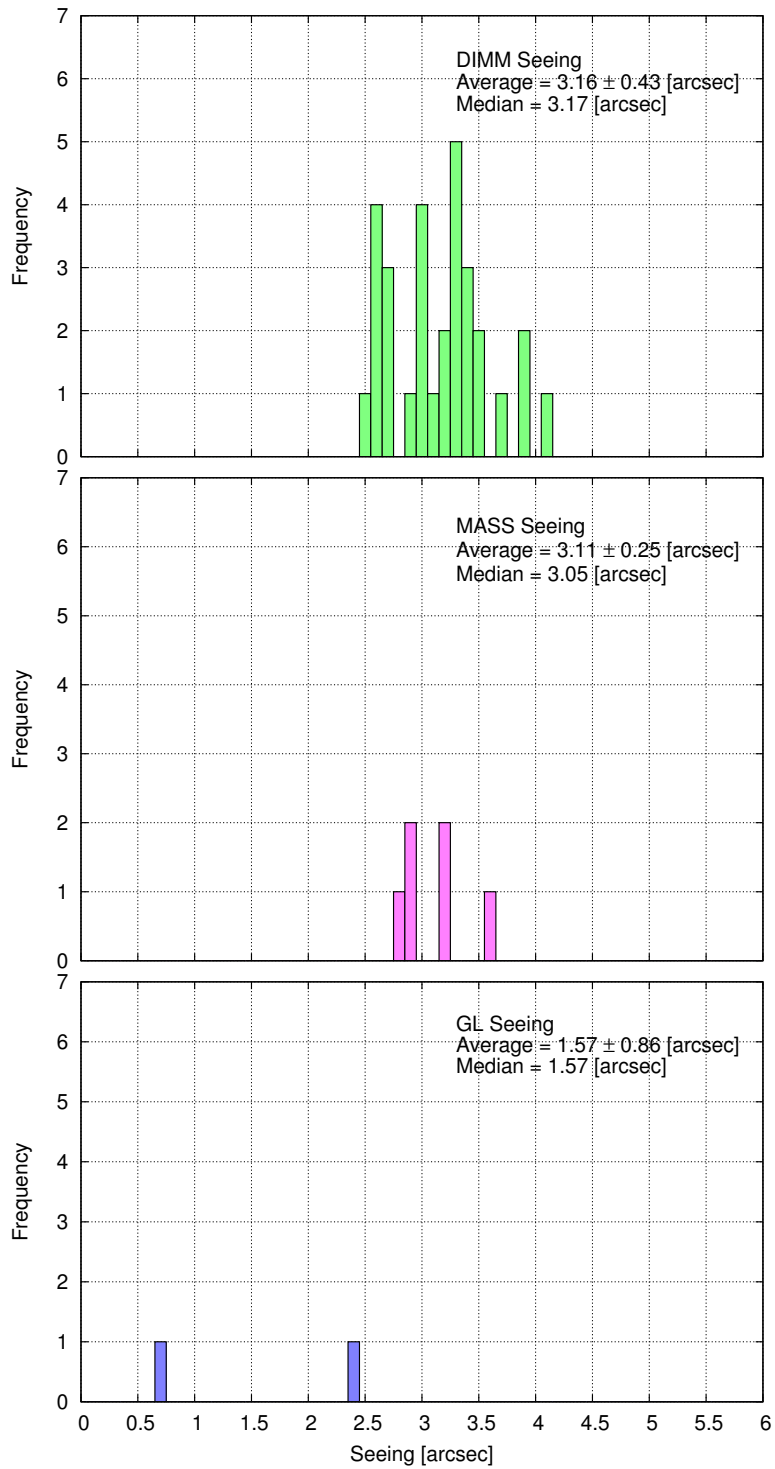


図 4.22: 2013年10月21日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.12 2013年10月22日

18時26分からはくちょう座デネブ(視等級1.25等)、21時38分からぎょしゃ座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。夕方からガスが発生していたが、天頂付近には影響は少ないと考え観測を開始した。この夜は雲の通過はほとんどなかったが、結局ガスは一晩中発生していた。03時からは観測天体が見えなくなってしまうほど、ガスが濃くなった。

表 4.24: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$3.87 \pm 1.16$	3.70
MASS	$1.84 \pm 0.51$	1.84
	$5.24 \pm 0.62$	5.38
GL	$2.34 \pm 0.66$	2.38

表 4.25:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$7.79 \times 10^{-14} \pm 2.47 \times 10^{-14}$	$6.99 \times 10^{-14}$
8	$5.37 \times 10^{-15} \pm 1.01 \times 10^{-14}$	$2.29 \times 10^{-21}$
4	$5.41 \times 10^{-14} \pm 5.49 \times 10^{-14}$	$3.79 \times 10^{-14}$
2	$3.16 \times 10^{-13} \pm 2.93 \times 10^{-13}$	$1.90 \times 10^{-13}$
1	$5.43 \times 10^{-13} \pm 5.38 \times 10^{-13}$	$3.46 \times 10^{-13}$
0.5	$3.89 \times 10^{-12} \pm 3.69 \times 10^{-12}$	$1.69 \times 10^{-12}$

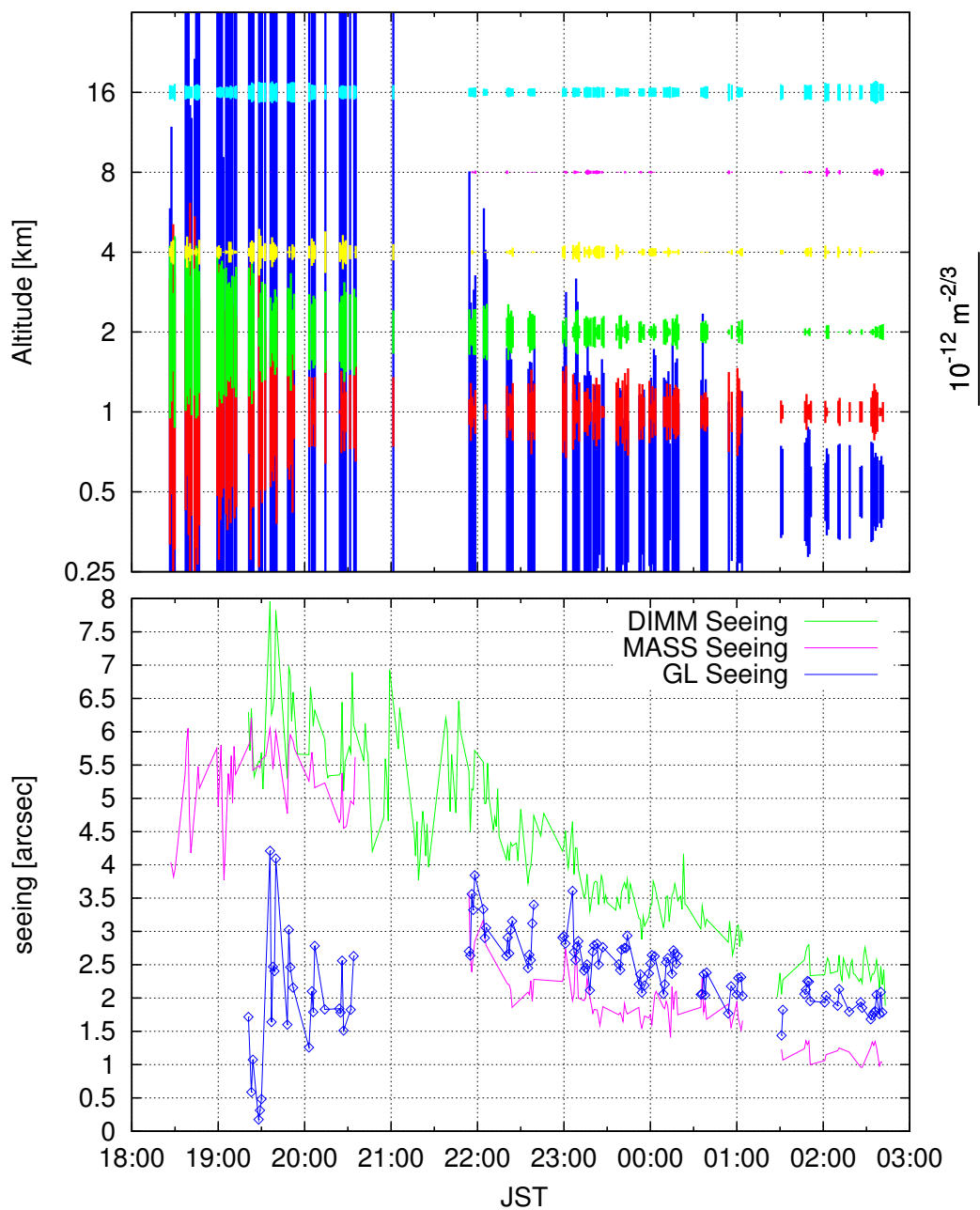


図 4.23: (上)2013 年 10 月 22 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

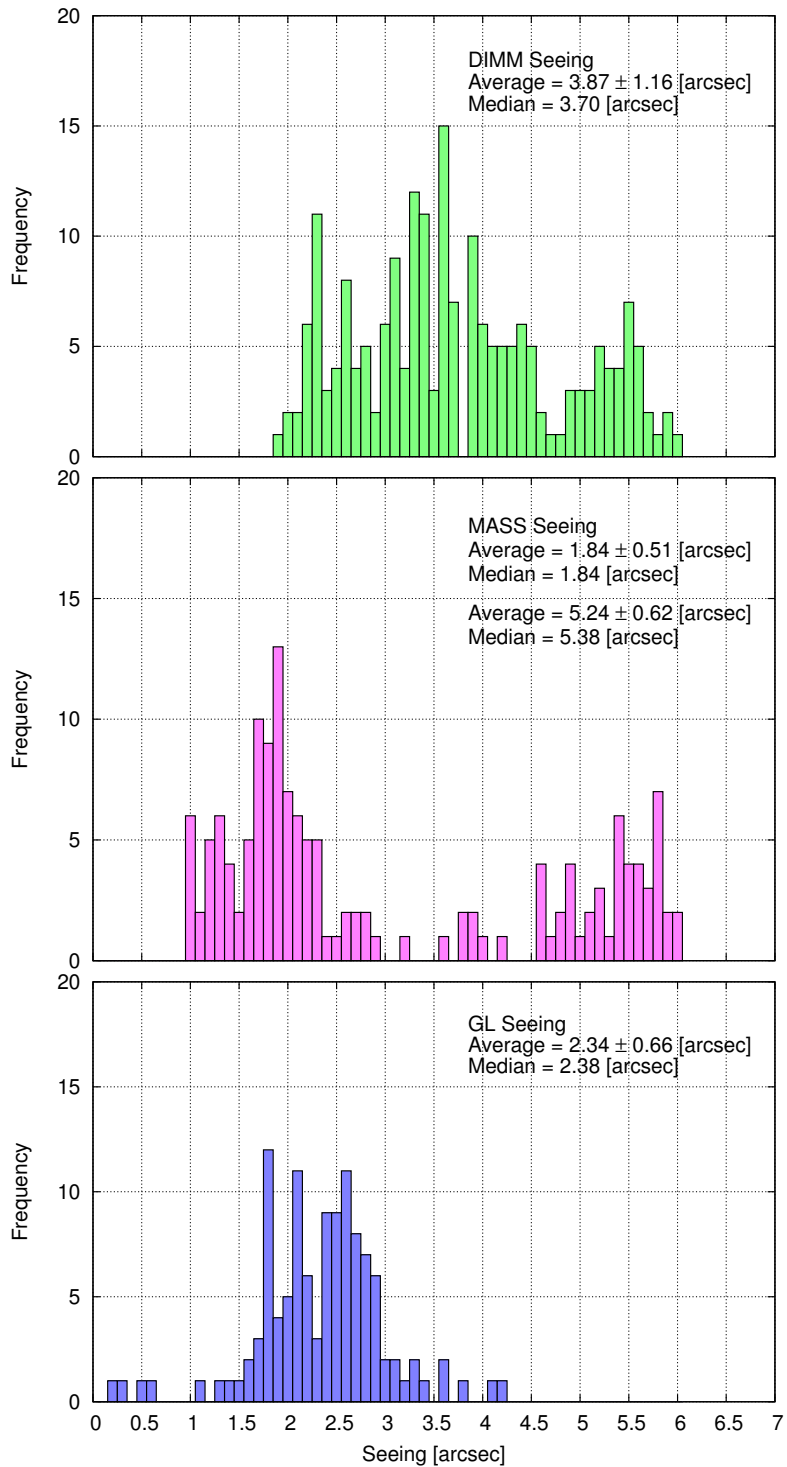


図 4.24: 2013 年 10 月 22 日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.13 2013年10月23日

21時40分からはくちょう座デネブ(視等級1.25等)、23時26分からぎょしゃ座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。この日も10月22日と同じく、夕方からガスが発生していた。前日より濃く観測機器の結露が著しかったので、観測を行わなかった。21時30分からガスが薄くなったので、観測を開始したが23時から再びガスが濃くなった。

表 4.26: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$1.47 \pm 0.12$	1.46
MASS	$0.56 \pm 0.08$	0.55
GL	$1.31 \pm 0.13$	1.30

表 4.27:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$7.95 \times 10^{-14} \pm 1.51 \times 10^{-14}$	$7.56 \times 10^{-14}$
8	$2.07 \times 10^{-14} \pm 2.68 \times 10^{-14}$	$6.75 \times 10^{-15}$
4	$6.01 \times 10^{-15} \pm 7.01 \times 10^{-15}$	$2.32 \times 10^{-15}$
2	$2.50 \times 10^{-14} \pm 2.27 \times 10^{-14}$	$2.12 \times 10^{-14}$
1	$1.32 \times 10^{-14} \pm 1.85 \times 10^{-14}$	$7.59 \times 10^{-15}$
0.5	$4.27 \times 10^{-14} \pm 2.32 \times 10^{-14}$	$4.60 \times 10^{-14}$

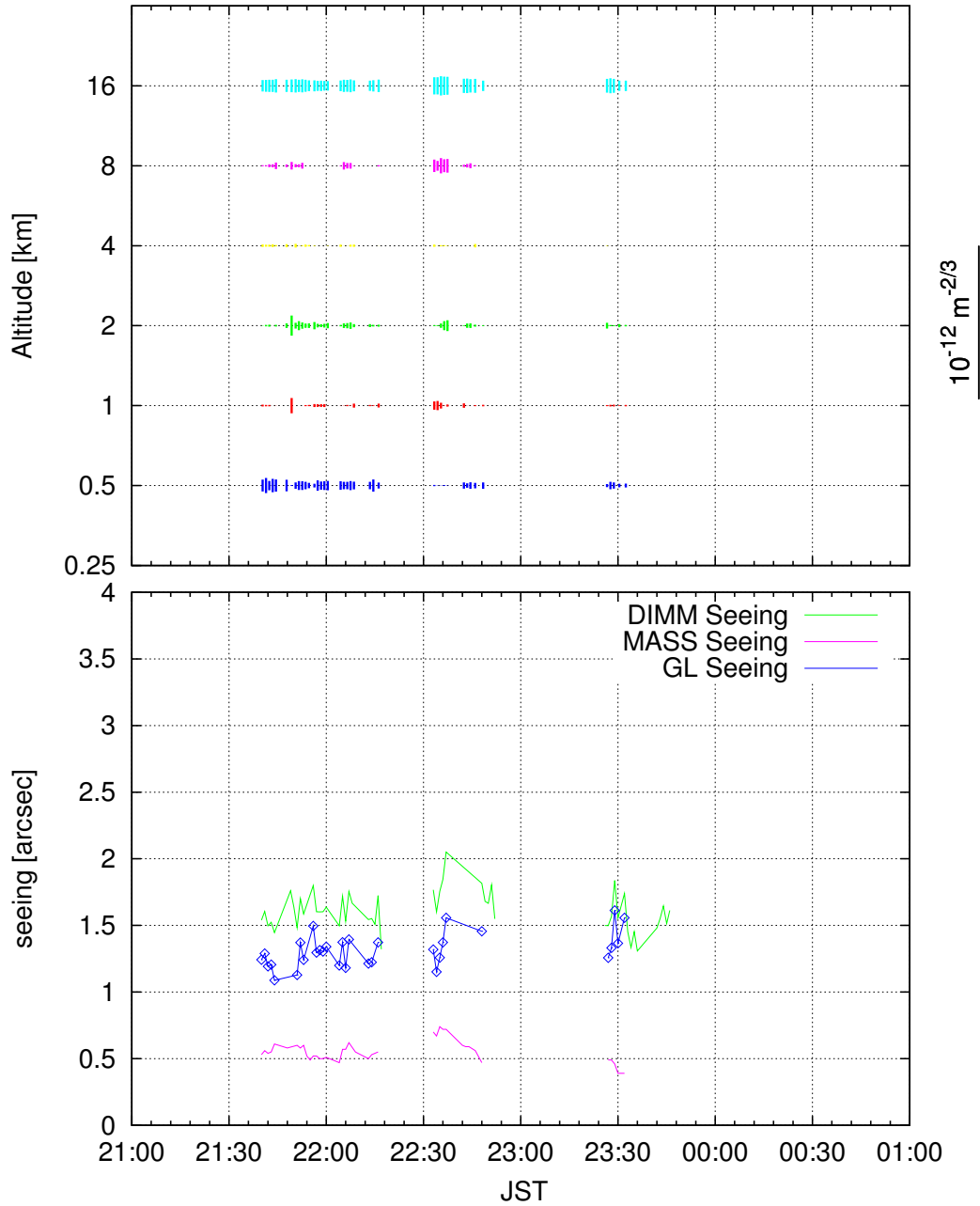


図 4.25: (上)2013 年 10 月 23 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

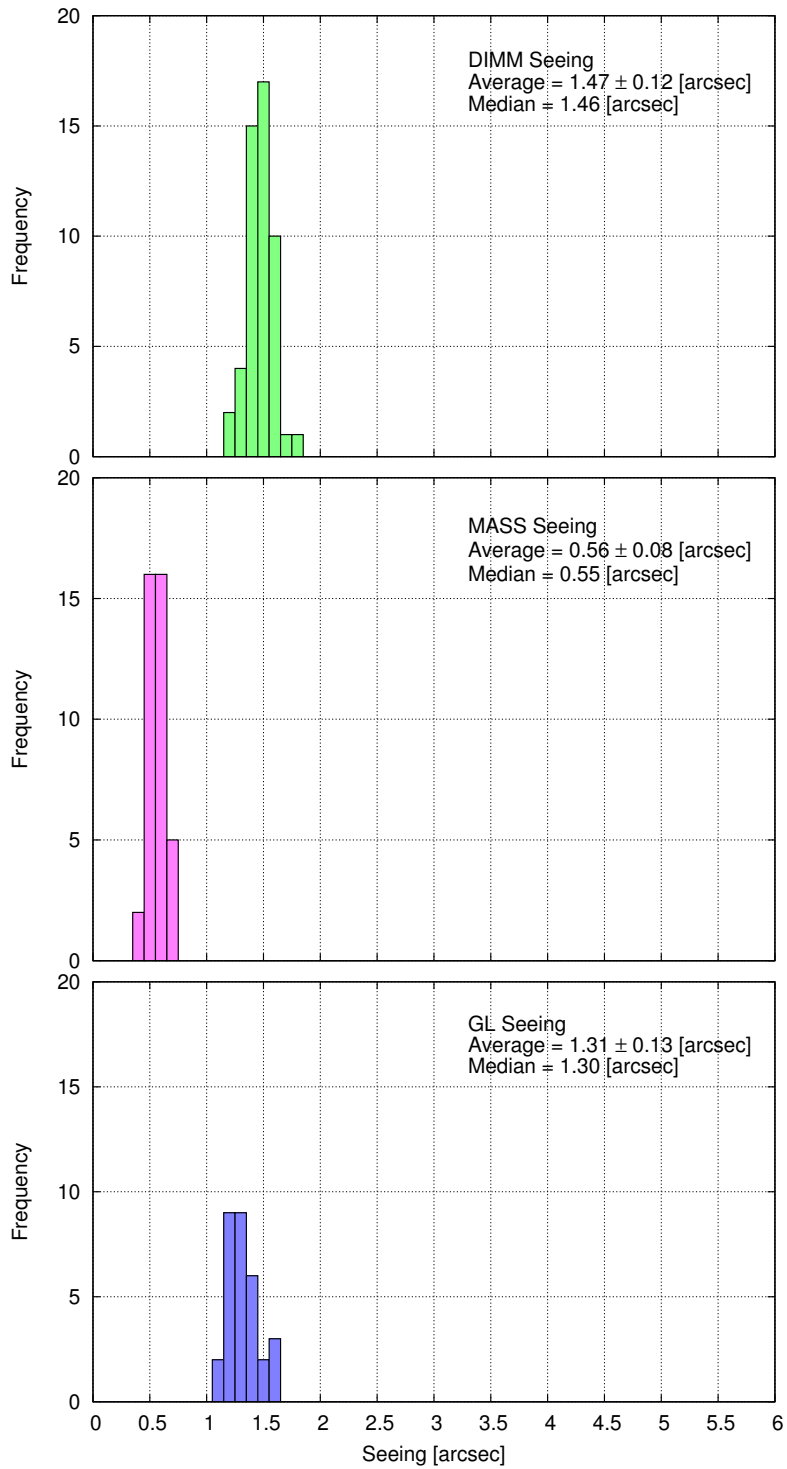


図 4.26: 2013 年 10 月 23 日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.14 2013年11月05日

20時26分からはくちょう座デネブ(視等級1.25等)、22時16分からぎょしゃ座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。18時ごろは晴れていたのに、ピクセルスケールの測定のためアルビレオを撮像していた。その後わずかだがガスが発生した。この日はほとんどデータをとれていない。雲も通過しており、雲が少なく観測天体が見える時に観測を行っている。

表 4.28: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$1.91 \pm 0.44$	1.79
MASS	$1.25 \pm 0.34$	1.33
GL	$1.31 \pm 0.38$	1.16

表 4.29:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$5.79 \times 10^{-14} \pm 3.58 \times 10^{-14}$	$5.11 \times 10^{-14}$
8	$2.45 \times 10^{-14} \pm 3.21 \times 10^{-14}$	$7.60 \times 10^{-15}$
4	$3.34 \times 10^{-14} \pm 3.93 \times 10^{-14}$	$1.95 \times 10^{-14}$
2	$1.39 \times 10^{-13} \pm 1.03 \times 10^{-13}$	$1.20 \times 10^{-13}$
1	$7.20 \times 10^{-14} \pm 6.04 \times 10^{-14}$	$5.71 \times 10^{-14}$
0.5	$5.60 \times 10^{-13} \pm 3.26 \times 10^{-13}$	$4.95 \times 10^{-13}$



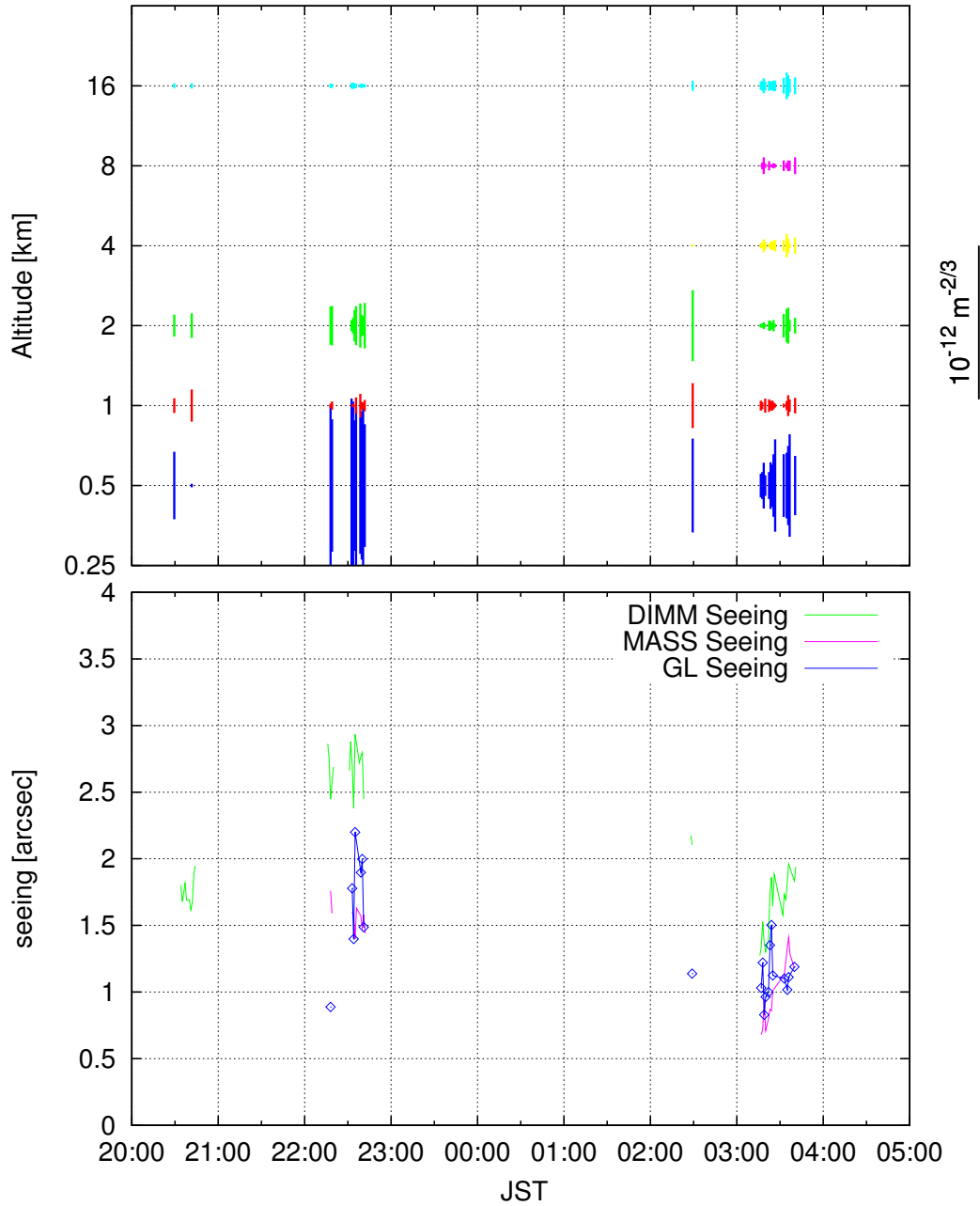


図 4.27: (上)2013 年 11 月 05 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

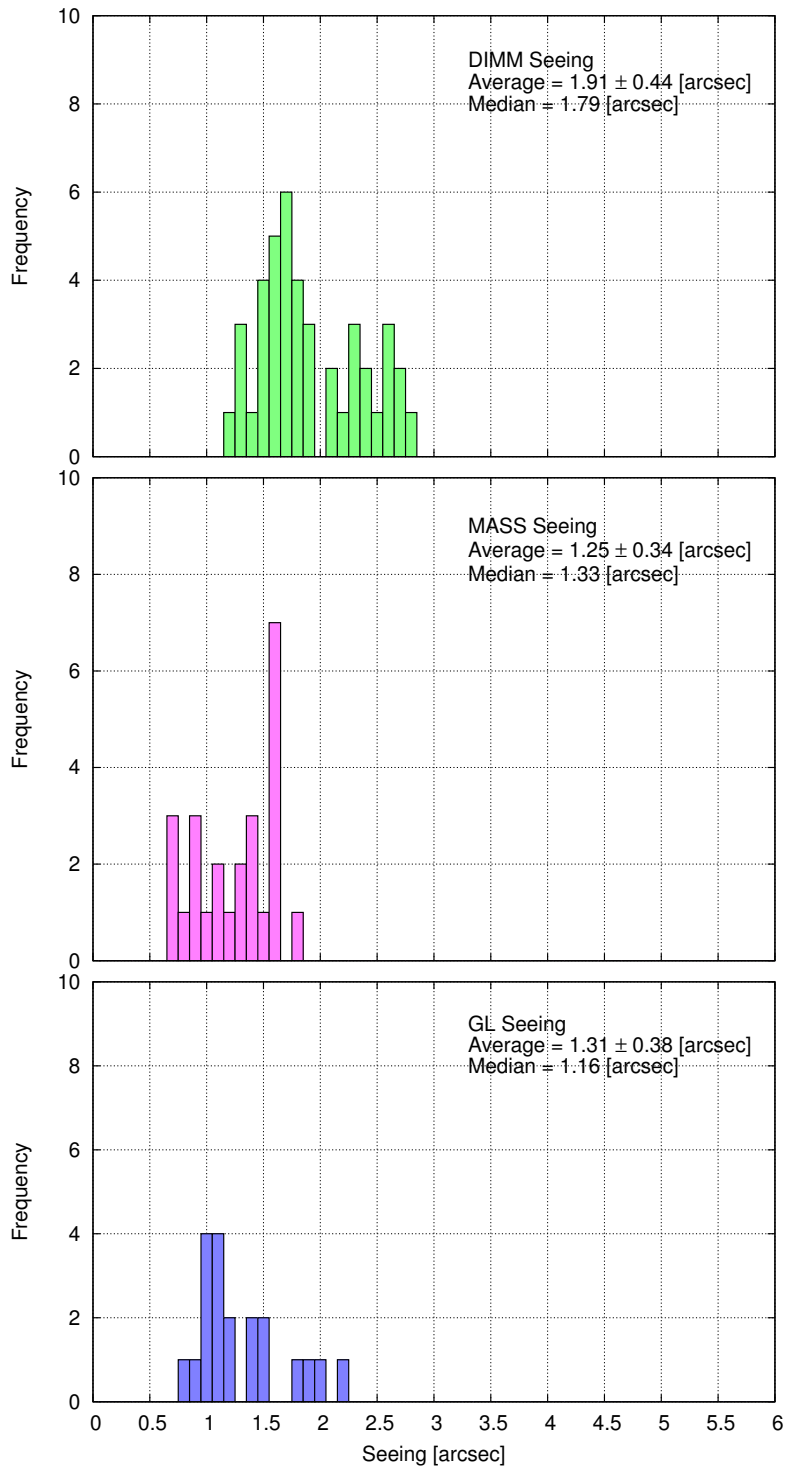


図 4.28: 2013年11月05日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.15 2013年11月11日

02時06分からぎよしや座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。夕方から厚い雲で覆われていて、21時からは雨が降り始めた。01時30分から晴れ始めたので観測を開始した。時間が経つにつれて雲の通過が少なくなり、その後薄明まで快晴であった。

表 4.30: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$2.04 \pm 0.48$	2.08
	$3.82 \pm 0.36$	3.84
MASS	$1.23 \pm 0.33$	1.15
	$2.99 \pm 0.31$	3.05
GL	$1.43 \pm 0.44$	1.41

表 4.31:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$1.42 \times 10^{-13} \pm 4.03 \times 10^{-14}$	$1.39 \times 10^{-13}$
8	$1.95 \times 10^{-14} \pm 2.13 \times 10^{-14}$	$1.46 \times 10^{-14}$
4	$2.52 \times 10^{-13} \pm 1.64 \times 10^{-13}$	$2.00 \times 10^{-13}$
2	$8.38 \times 10^{-13} \pm 5.33 \times 10^{-13}$	$5.55 \times 10^{-13}$
1	$2.85 \times 10^{-13} \pm 4.87 \times 10^{-13}$	$4.41 \times 10^{-14}$
0.5	$4.81 \times 10^{-13} \pm 7.29 \times 10^{-13}$	$9.29 \times 10^{-14}$

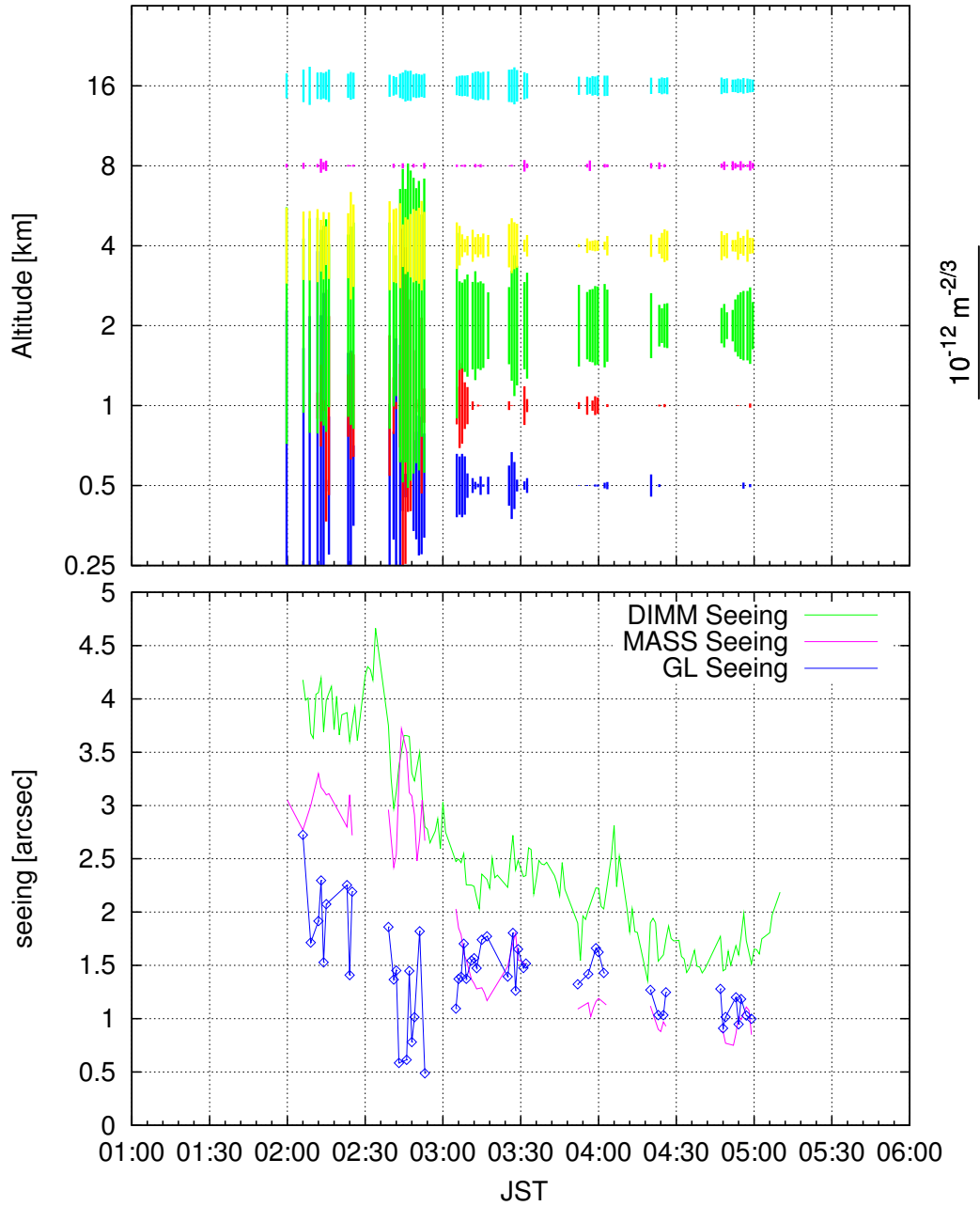


図 4.29: (上)2013 年 11 月 11 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

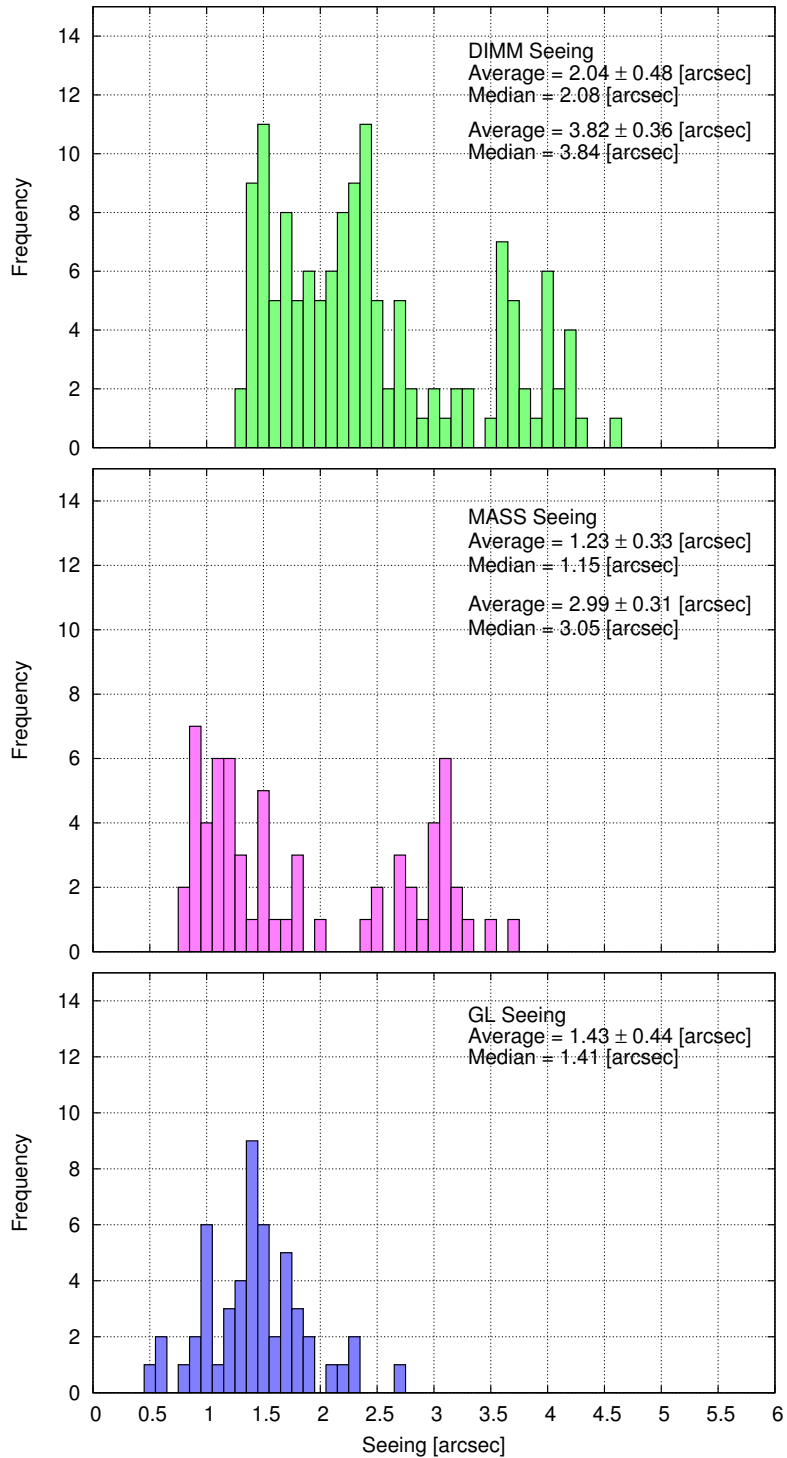


図 4.30: 2013年11月11日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.16 2013年11月13日

03時03分からぎよしや座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。この日はほとんど観測を行えていない。夕方から雲がかかっており、前半夜は観測天体がみられなかった。02時30分ごろから晴れ始めたが、わずかに雲が通過していた。

表 4.32: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$2.51 \pm 0.15$	2.50
MASS	$0.92 \pm 0.11$	0.90
GL	$2.21 \pm 0.22$	2.18

表 4.33:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-2/3}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-2/3}$ ]
16	$6.57 \times 10^{-14} \pm 1.04 \times 10^{-14}$	$6.72 \times 10^{-14}$
8	$8.97 \times 10^{-15} \pm 1.25 \times 10^{-14}$	$4.21 \times 10^{-15}$
4	$5.90 \times 10^{-14} \pm 1.23 \times 10^{-14}$	$5.30 \times 10^{-14}$
2	$1.32 \times 10^{-13} \pm 2.73 \times 10^{-14}$	$1.34 \times 10^{-13}$
1	$4.93 \times 10^{-14} \pm 3.61 \times 10^{-14}$	$4.13 \times 10^{-14}$
0.5	$2.55 \times 10^{-13} \pm 6.78 \times 10^{-14}$	$2.27 \times 10^{-13}$

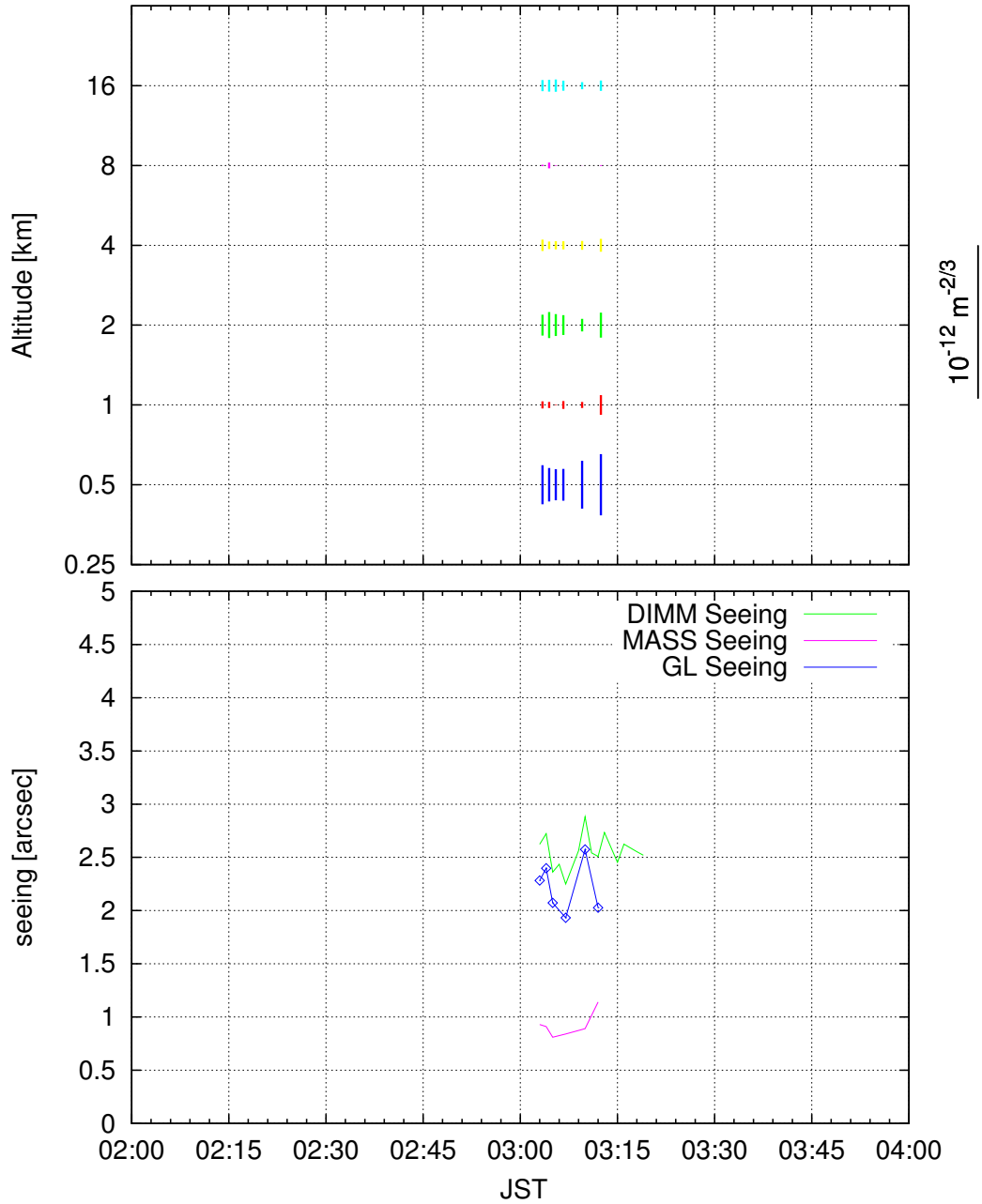


図 4.31: (上)2013 年 11 月 13 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

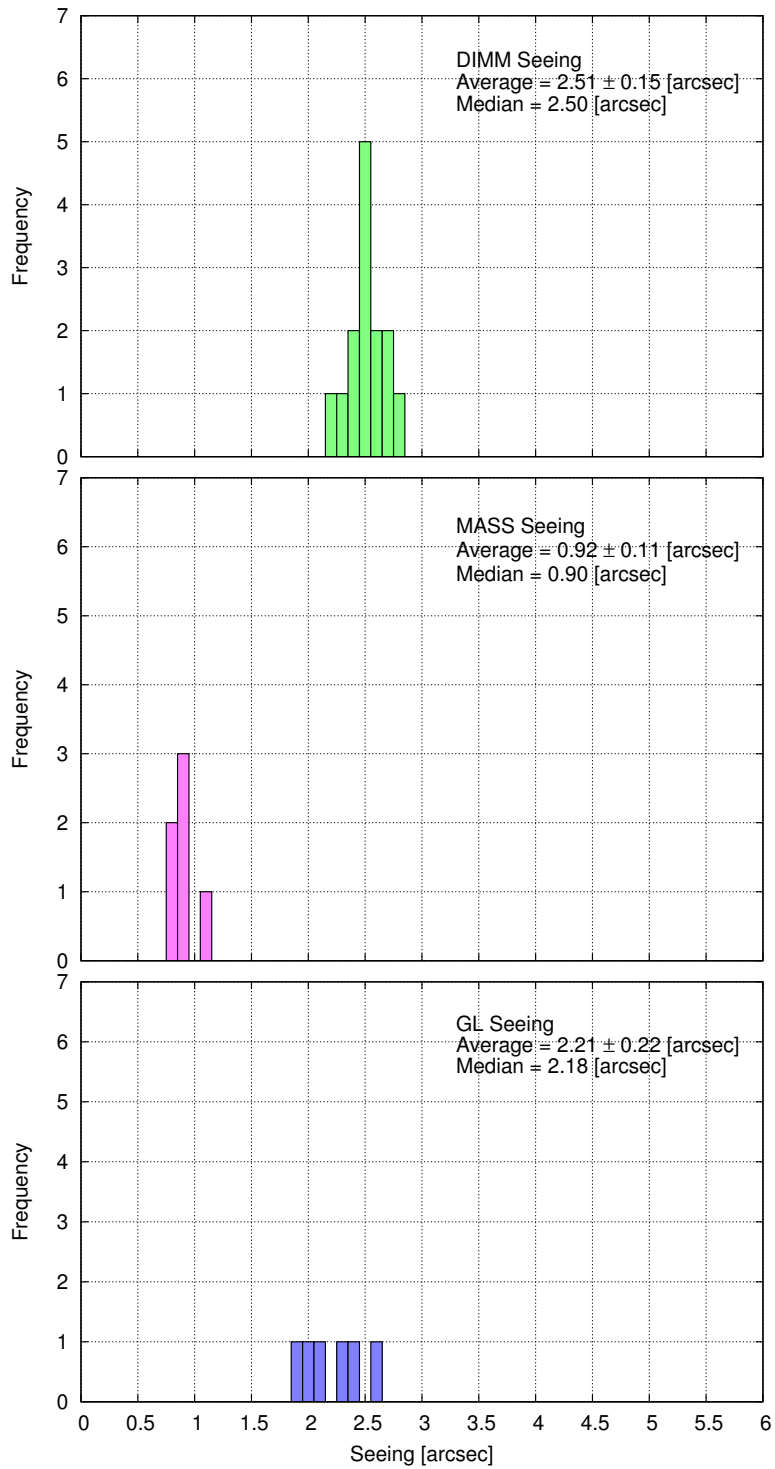


図 4.32: 2013年11月13日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング



#### 4.17 2013年11月15日

05時30分からぎよしや座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。この日もほとんど観測を行えていない。雲が少なくなり始めたのは薄明が始まってからだったが、観測を開始してデータをとっている。

表 4.34: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$1.91 \pm 0.21$	1.94
MASS	$1.00 \pm 0.17$	1.01
GL	$1.38 \pm 0.08$	1.35

表 4.35:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$6.06 \times 10^{-14} \pm 2.47 \times 10^{-15}$	$6.06 \times 10^{-14}$
8	$2.12 \times 10^{-14} \pm 1.07 \times 10^{-14}$	$1.97 \times 10^{-14}$
4	$1.89 \times 10^{-14} \pm 1.34 \times 10^{-14}$	$1.56 \times 10^{-14}$
2	$9.63 \times 10^{-14} \pm 1.69 \times 10^{-14}$	$9.01 \times 10^{-14}$
1	$8.54 \times 10^{-17} \pm 7.12 \times 10^{-17}$	$6.24 \times 10^{-17}$
0.5	$3.17 \times 10^{-13} \pm 1.15 \times 10^{-13}$	$3.38 \times 10^{-13}$

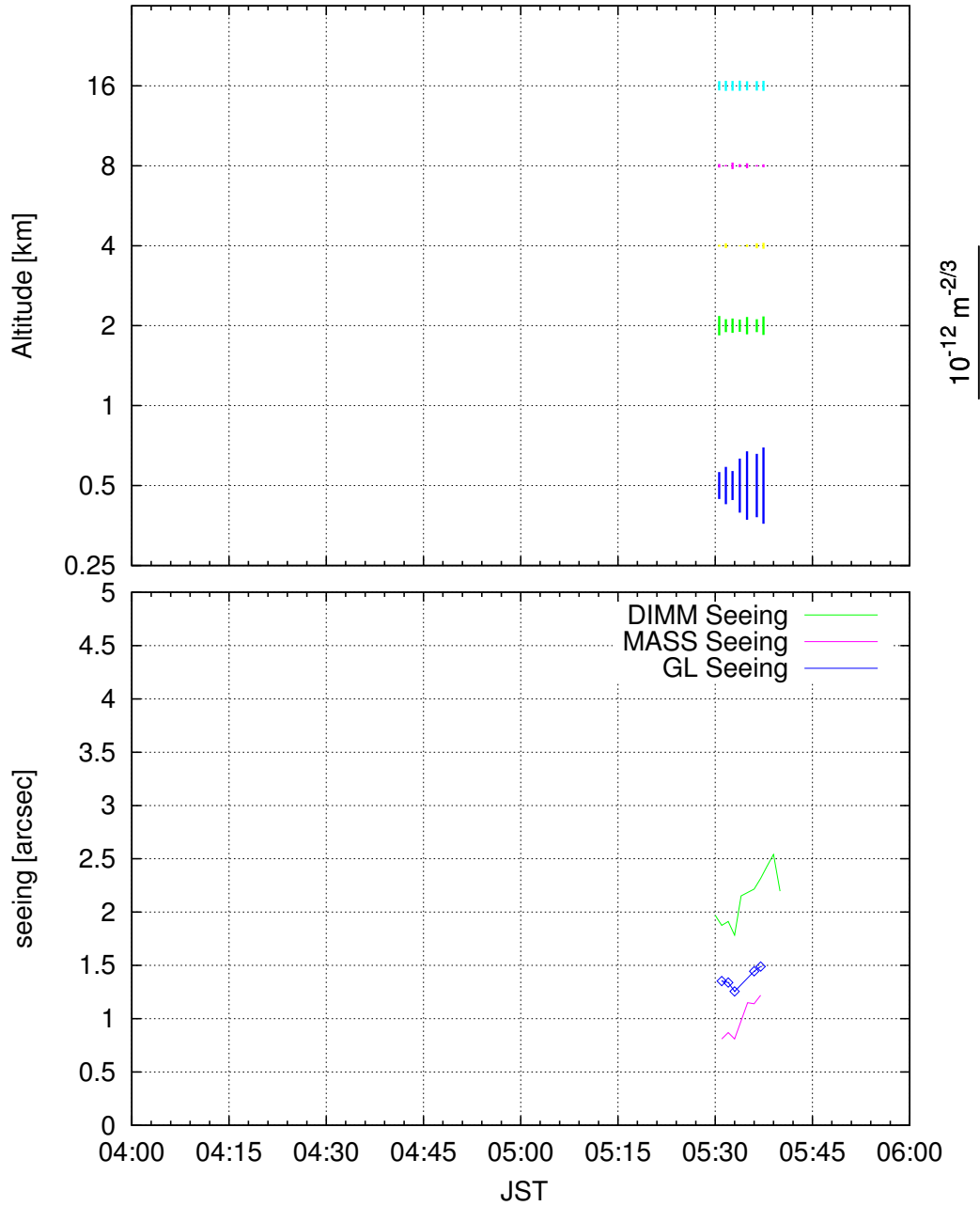


図 4.33: (上)2013 年 11 月 15 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

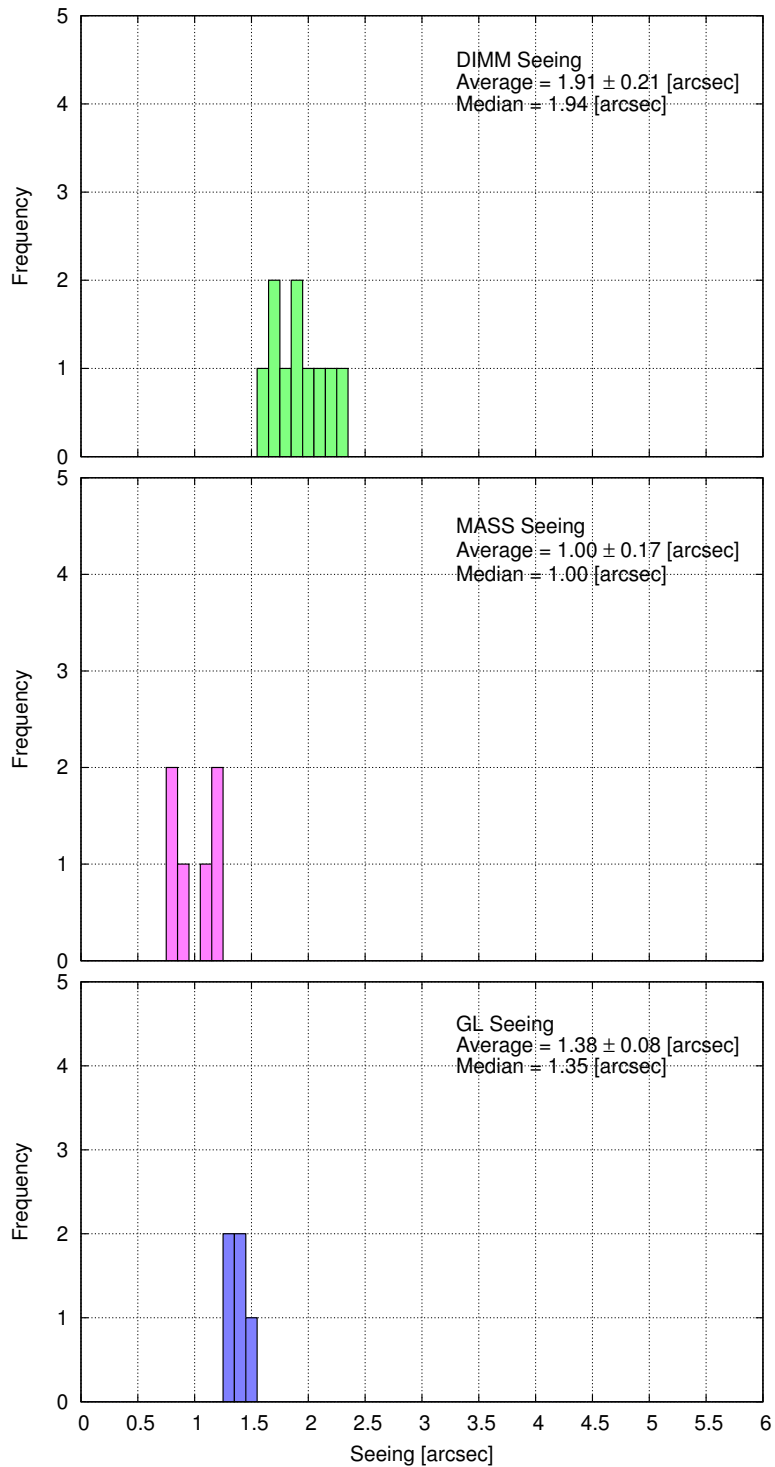


図 4.34: 2013年11月15日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.18 2013年12月16日

18時57分からぎよしゃ座カペラ (視等級 0.08 等) を参照星にしている。12月の観測は9日間行ったが、晴れたのはわずか1日だった。前半夜は雲の通過が多く、合間を狙って観測を続けた。00時を過ぎると、雲が少なくなり安定してデータを取れるようになった。

表 4.36: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$2.65 \pm 0.28$	2.63
MASS	$2.42 \pm 0.31$	2.37
GL	$0.91 \pm 0.37$	0.94

表 4.37:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-2/3}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-2/3}$ ]
16	$1.23 \times 10^{-13} \pm 1.94 \times 10^{-14}$	$1.30 \times 10^{-13}$
8	$6.41 \times 10^{-14} \pm 4.04 \times 10^{-14}$	$5.61 \times 10^{-14}$
4	$4.22 \times 10^{-13} \pm 1.22 \times 10^{-13}$	$4.59 \times 10^{-13}$
2	$8.79 \times 10^{-13} \pm 2.63 \times 10^{-13}$	$8.29 \times 10^{-13}$
1	$3.04 \times 10^{-13} \pm 2.76 \times 10^{-13}$	$1.82 \times 10^{-13}$
0.5	$1.19 \times 10^{-12} \pm 4.44 \times 10^{-13}$	$1.29 \times 10^{-12}$

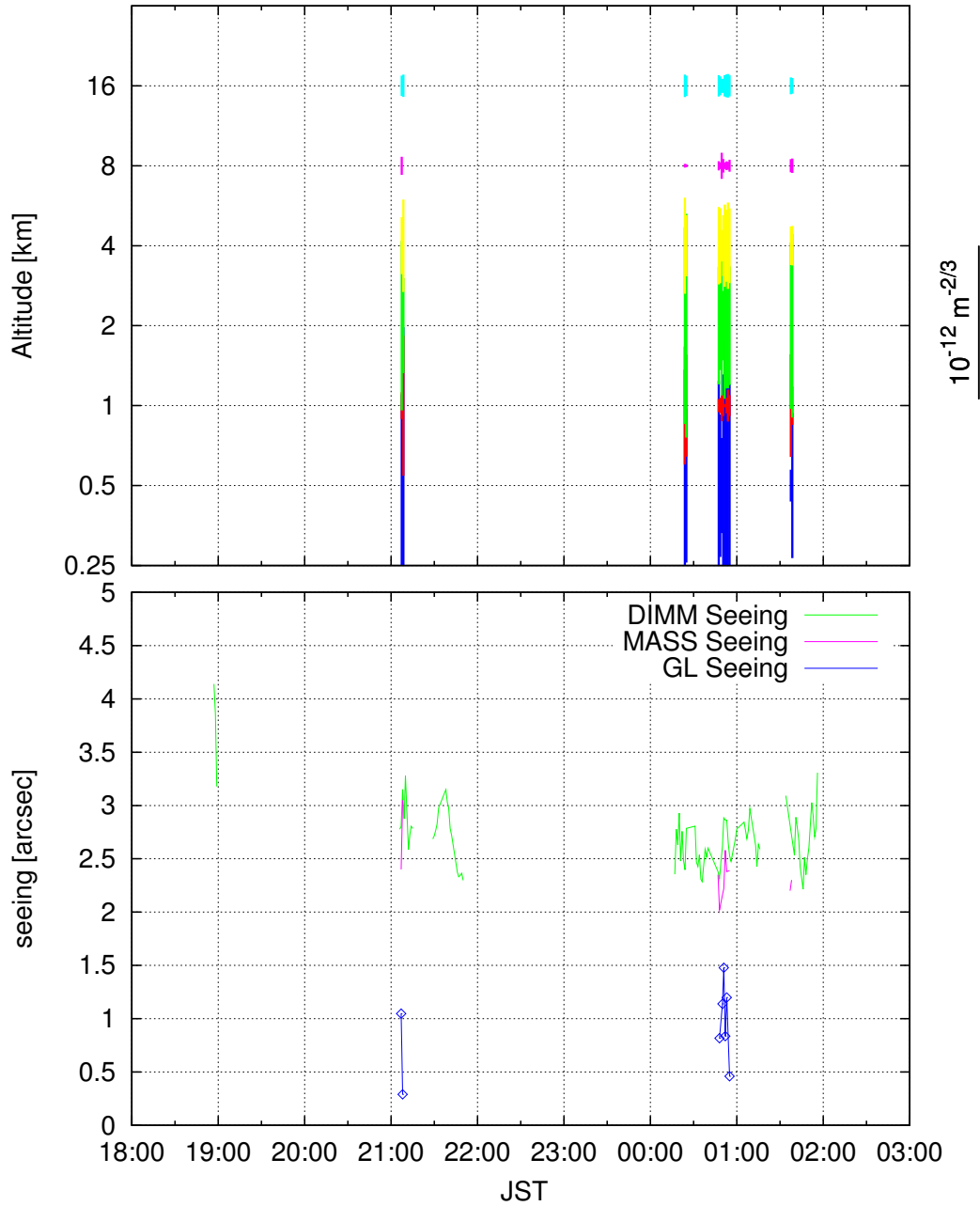


図 4.35: (上)2013 年 12 月 16 日大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5 匚, 赤:1 匚, 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

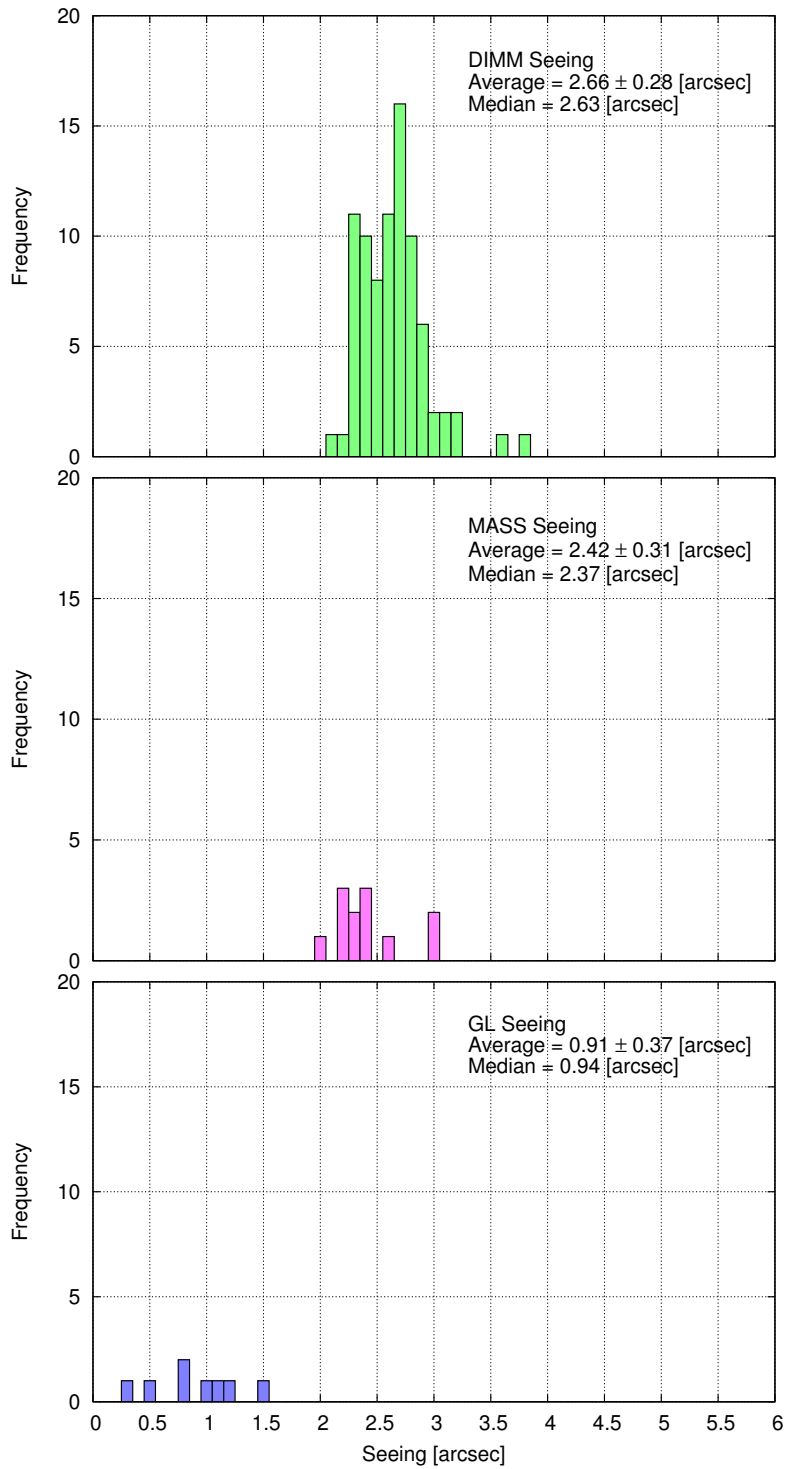


図 4.36: 2013年12月16日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.19 2014年02月04日

22時25分からぎよしや座カペラ (視等級 0.08 等)、00時58分からしし座レグルス (視等級 1.4 等)、そして02時52分からうしかい座アークトゥルス (視等級-0.04 等) を参照星にしている。この日は夕方から薄明開始まで、雲の通過がなく快晴であった。

表 4.38: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$2.42 \pm 0.53$	2.39
MASS	$1.17 \pm 0.37$	1.06
GL	$1.84 \pm 0.70$	1.83

表 4.39:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-2/3}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-2/3}$ ]
16	$9.70 \times 10^{-14} \pm 2.86 \times 10^{-14}$	$9.28 \times 10^{-14}$
8	$4.55 \times 10^{-14} \pm 3.00 \times 10^{-14}$	$4.73 \times 10^{-14}$
4	$1.08 \times 10^{-13} \pm 8.18 \times 10^{-14}$	$1.10 \times 10^{-13}$
2	$5.25 \times 10^{-13} \pm 3.42 \times 10^{-13}$	$4.10 \times 10^{-13}$
1	$4.99 \times 10^{-14} \pm 1.42 \times 10^{-13}$	$7.55 \times 10^{-16}$
0.5	$4.71 \times 10^{-14} \pm 7.15 \times 10^{-14}$	$1.43 \times 10^{-14}$

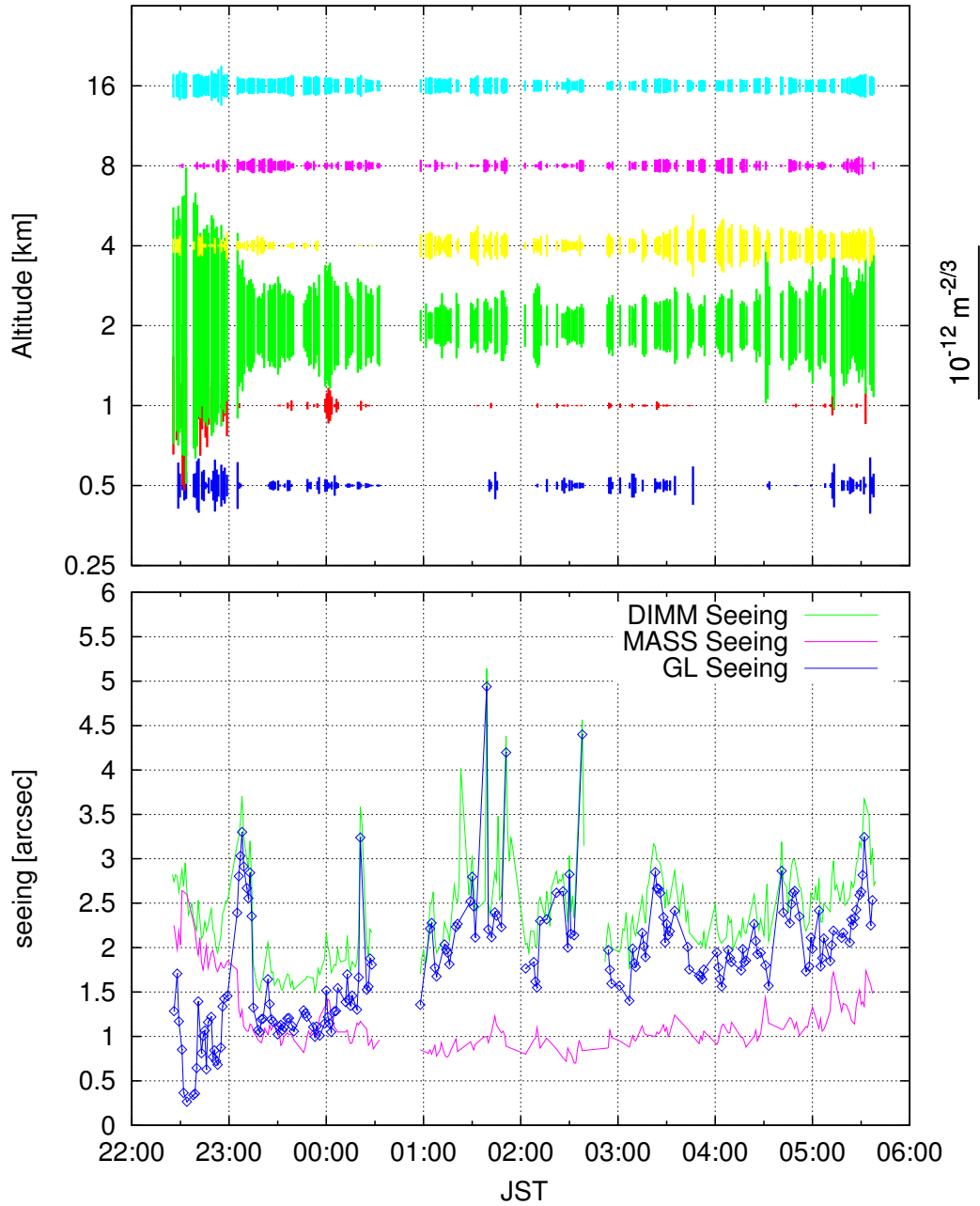


図 4.37: (上)2014年02月04日大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5km, 赤:1km, 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)



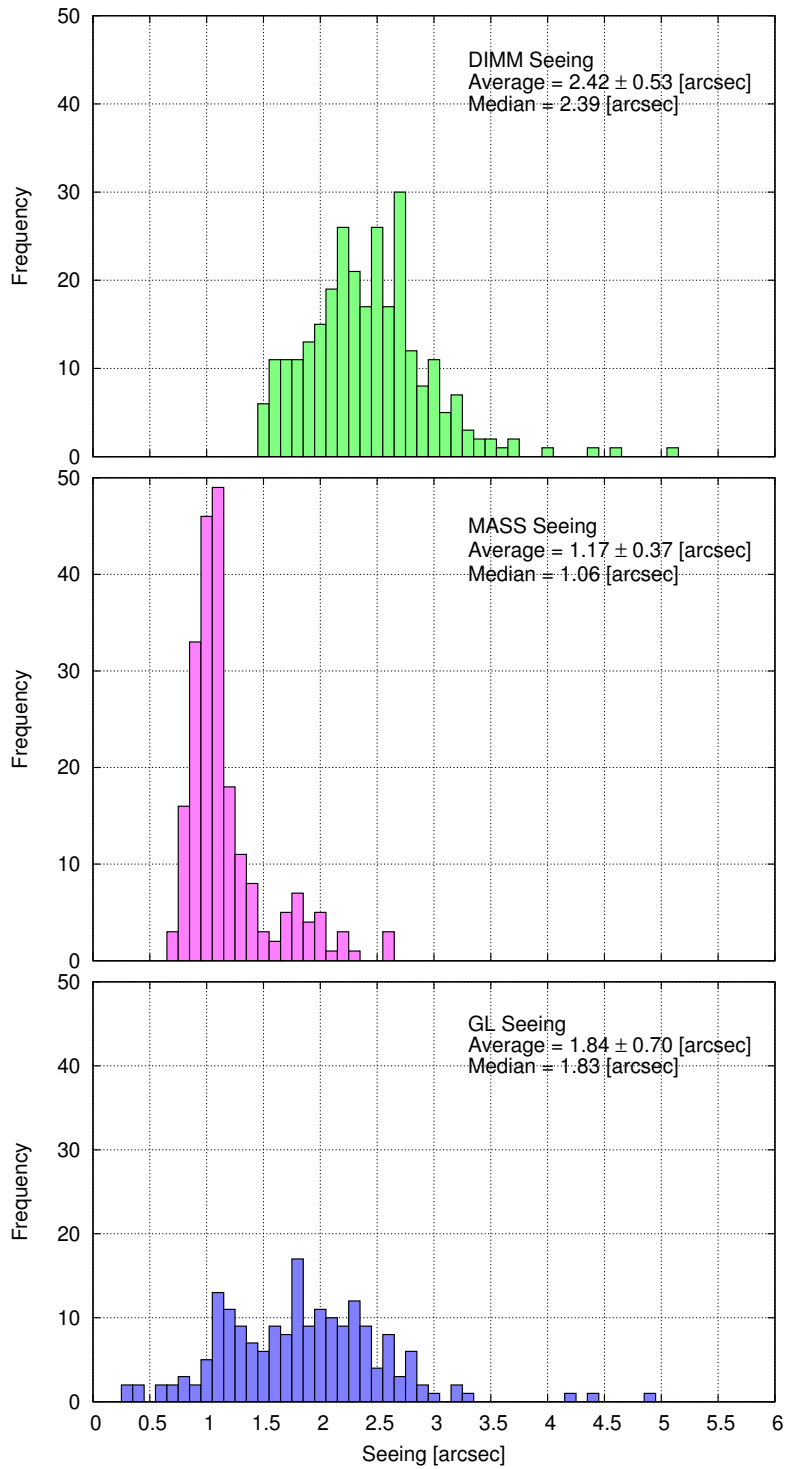


図 4.38: 2014年02月04日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.20 2014年02月05日

20時24分からぎよしや座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。夕方から雲の通過が多く測定が困難であったが、20時ごろから雲の量が少なくなり参照星が視認できるようになったので測定を開始した。しかし1時間後には濃い雲が辺りを覆い、その後は測定を行うことができなかった。

表 4.40: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$3.16 \pm 0.61$	3.16
MASS	$2.35 \pm 0.32$	2.42
GL	$1.50 \pm 0.39$	1.55

表 4.41:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$1.01 \times 10^{-13} \pm 1.22 \times 10^{-14}$	$9.89 \times 10^{-14}$
8	$4.95 \times 10^{-14} \pm 3.83 \times 10^{-14}$	$4.88 \times 10^{-14}$
4	$3.63 \times 10^{-13} \pm 9.60 \times 10^{-14}$	$3.54 \times 10^{-13}$
2	$9.94 \times 10^{-13} \pm 2.88 \times 10^{-13}$	$1.03 \times 10^{-12}$
1	$2.09 \times 10^{-13} \pm 1.99 \times 10^{-13}$	$1.48 \times 10^{-13}$
0.5	$9.90 \times 10^{-13} \pm 4.38 \times 10^{-13}$	$1.06 \times 10^{-12}$

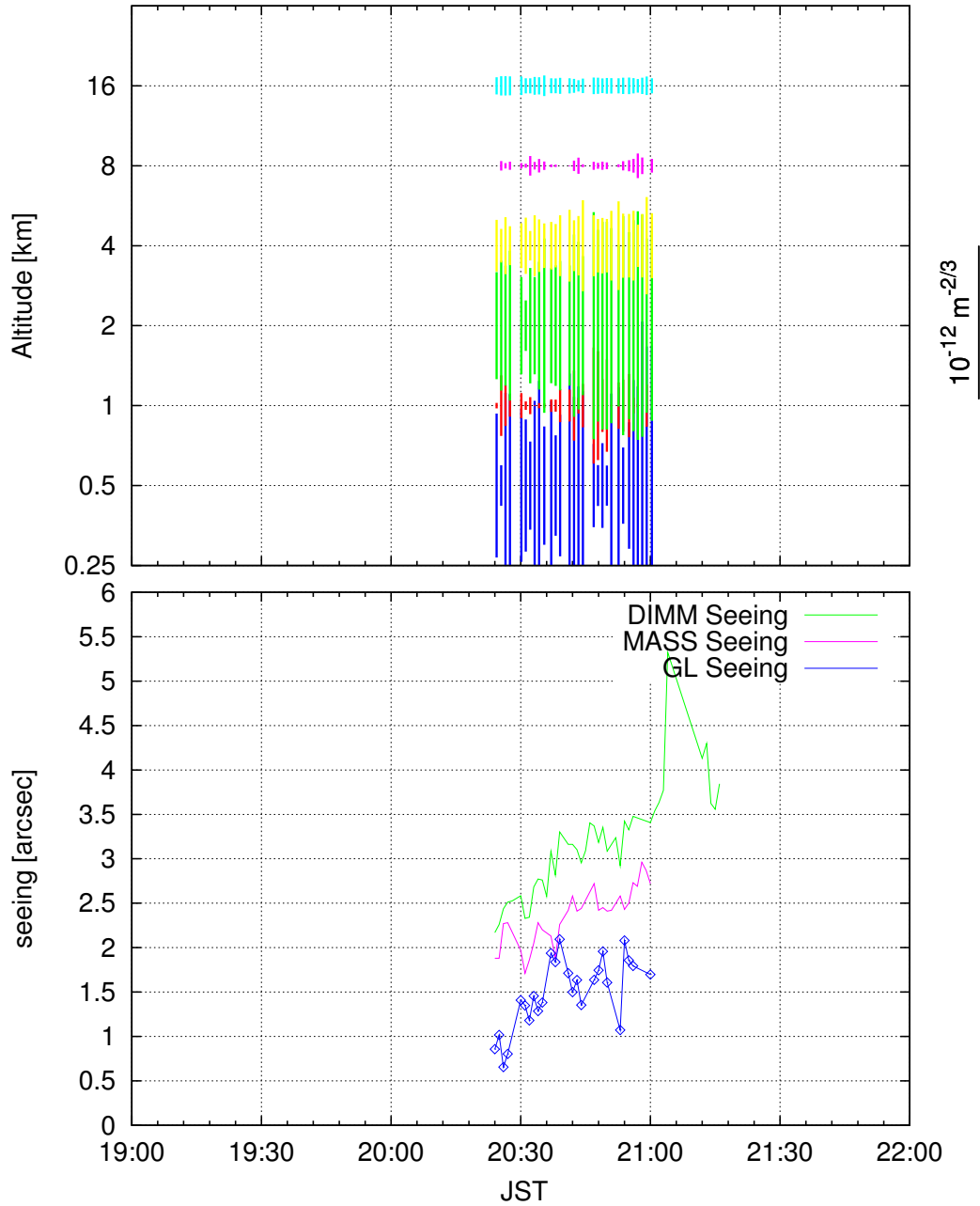


図 4.39: (上)2014 年 02 月 05 日大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5 匚, 赤:1 匚, 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

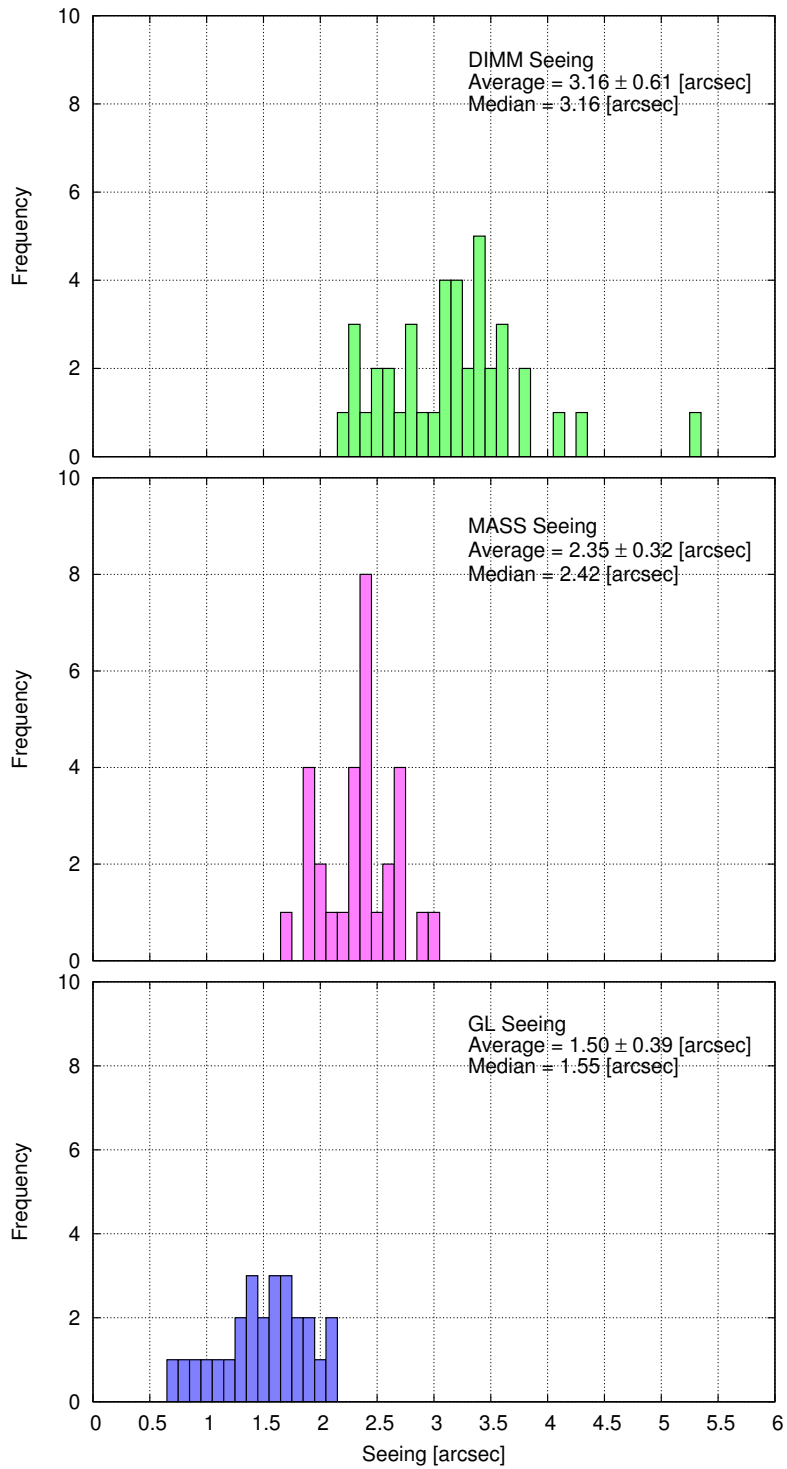


図 4.40: 2014年02月05日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.21 2014年02月07日

01時34分からうしかい座アークトゥルス(視等級-0.04等)を参照星にしている。1時ごろから快晴になり、薄明開始時まで雲の通過がほぼ見られなかった。

表 4.42: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$3.66 \pm 0.38$	3.58
MASS	$1.77 \pm 0.37$	1.75
GL	$2.96 \pm 0.40$	2.91

表 4.43:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$1.09 \times 10^{-13} \pm 2.54 \times 10^{-14}$	$1.04 \times 10^{-13}$
8	$4.53 \times 10^{-14} \pm 2.53 \times 10^{-14}$	$4.46 \times 10^{-14}$
4	$5.75 \times 10^{-14} \pm 3.64 \times 10^{-14}$	$5.73 \times 10^{-14}$
2	$4.04 \times 10^{-13} \pm 1.11 \times 10^{-13}$	$3.94 \times 10^{-13}$
1	$2.81 \times 10^{-13} \pm 1.61 \times 10^{-13}$	$2.88 \times 10^{-13}$
0.5	$7.70 \times 10^{-13} \pm 4.66 \times 10^{-13}$	$6.72 \times 10^{-13}$

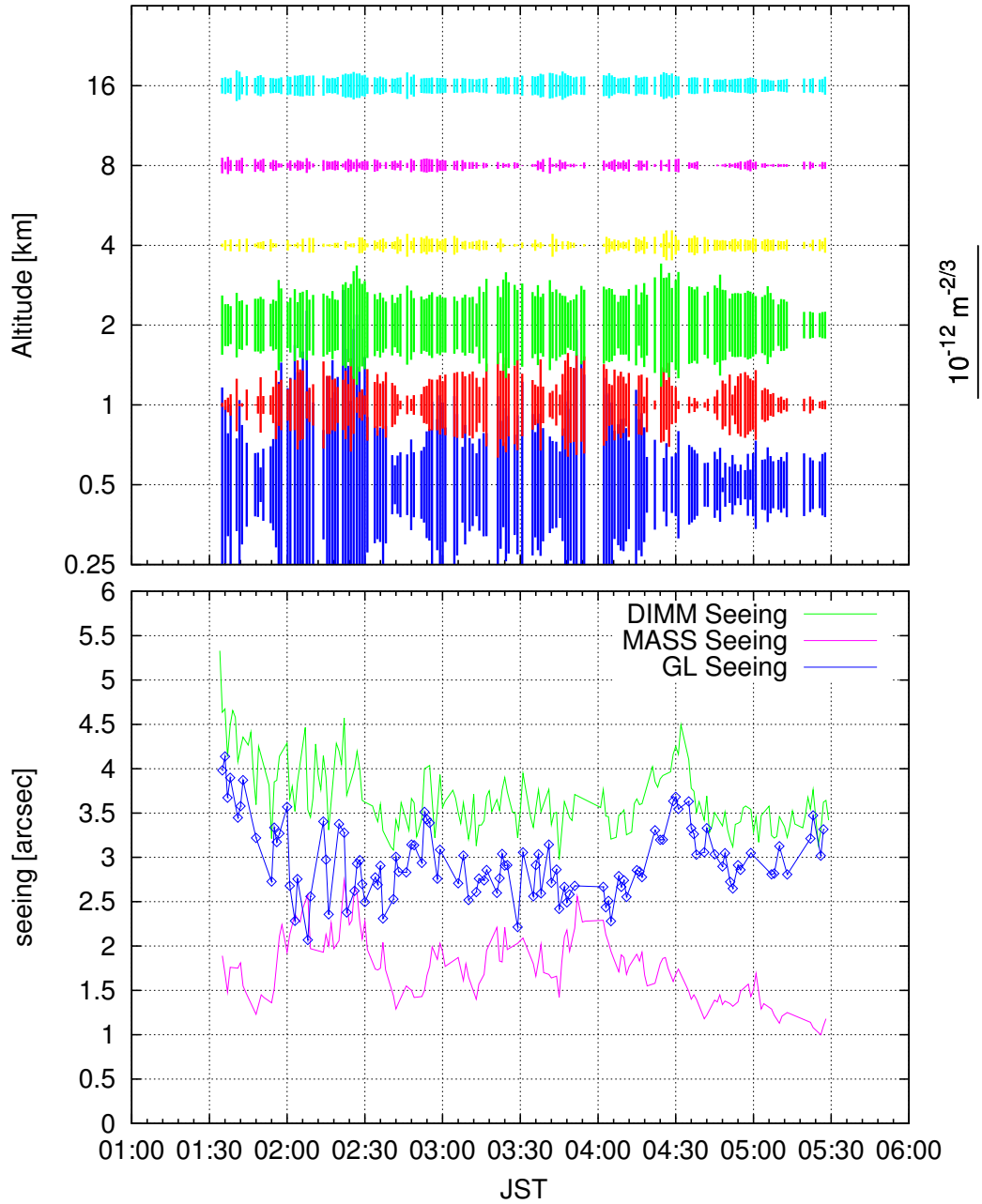


図 4.41: (上)2014 年 02 月 07 日大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

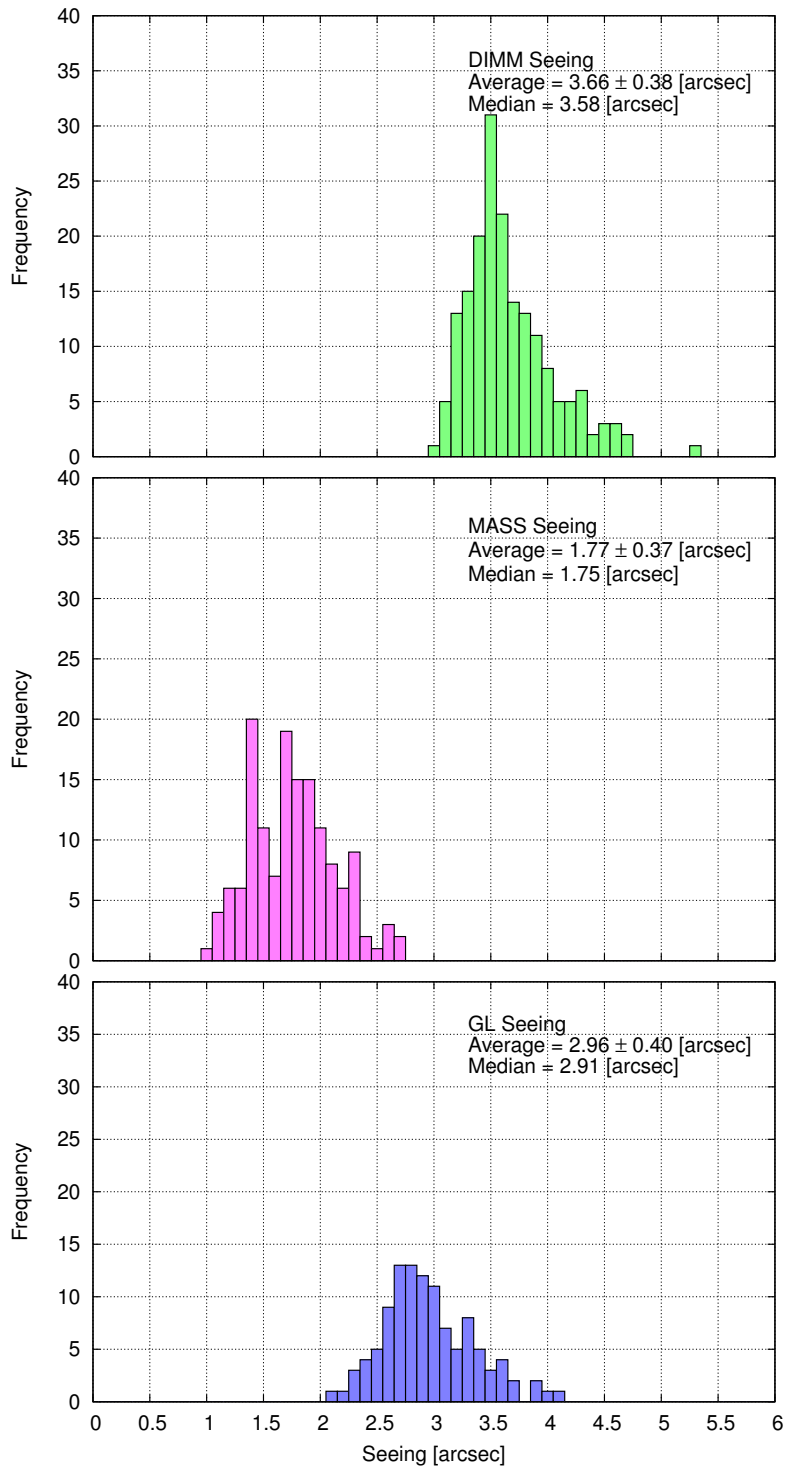


図 4.42: 2014年02月07日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.22 2014年02月08日

18時53分からぎよしや座カペラ(視等級0.08等)を参照星にしている。夕方から薄い雲が常に通過していた。23時からは雲が濃くなったので、測定を中止した。

表 4.44: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$4.39 \pm 0.86$	4.25
MASS	$2.65 \pm 0.38$	2.64
GL	$3.08 \pm 1.09$	2.95

表 4.45:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$5.45 \times 10^{-14} \pm 1.25 \times 10^{-14}$	$5.54 \times 10^{-14}$
8	$3.99 \times 10^{-14} \pm 3.96 \times 10^{-14}$	$2.95 \times 10^{-14}$
4	$1.33 \times 10^{-13} \pm 6.02 \times 10^{-14}$	$1.22 \times 10^{-13}$
2	$1.42 \times 10^{-13} \pm 8.54 \times 10^{-14}$	$1.38 \times 10^{-13}$
1	$7.81 \times 10^{-14} \pm 1.20 \times 10^{-13}$	$1.43 \times 10^{-14}$
0.5	$2.87 \times 10^{-12} \pm 7.03 \times 10^{-13}$	$2.76 \times 10^{-12}$



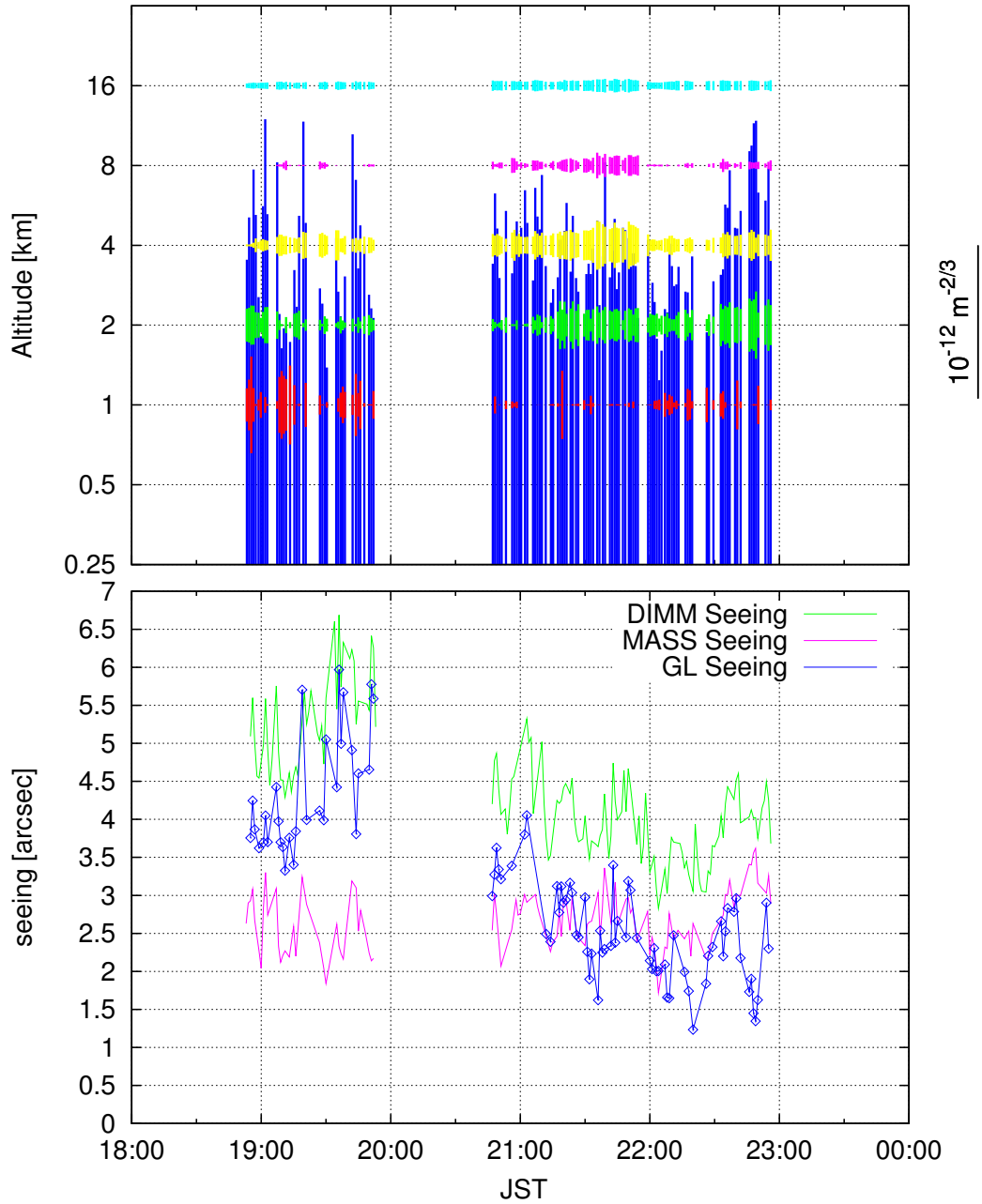


図 4.43: (上)2014 年 02 月 08 日大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

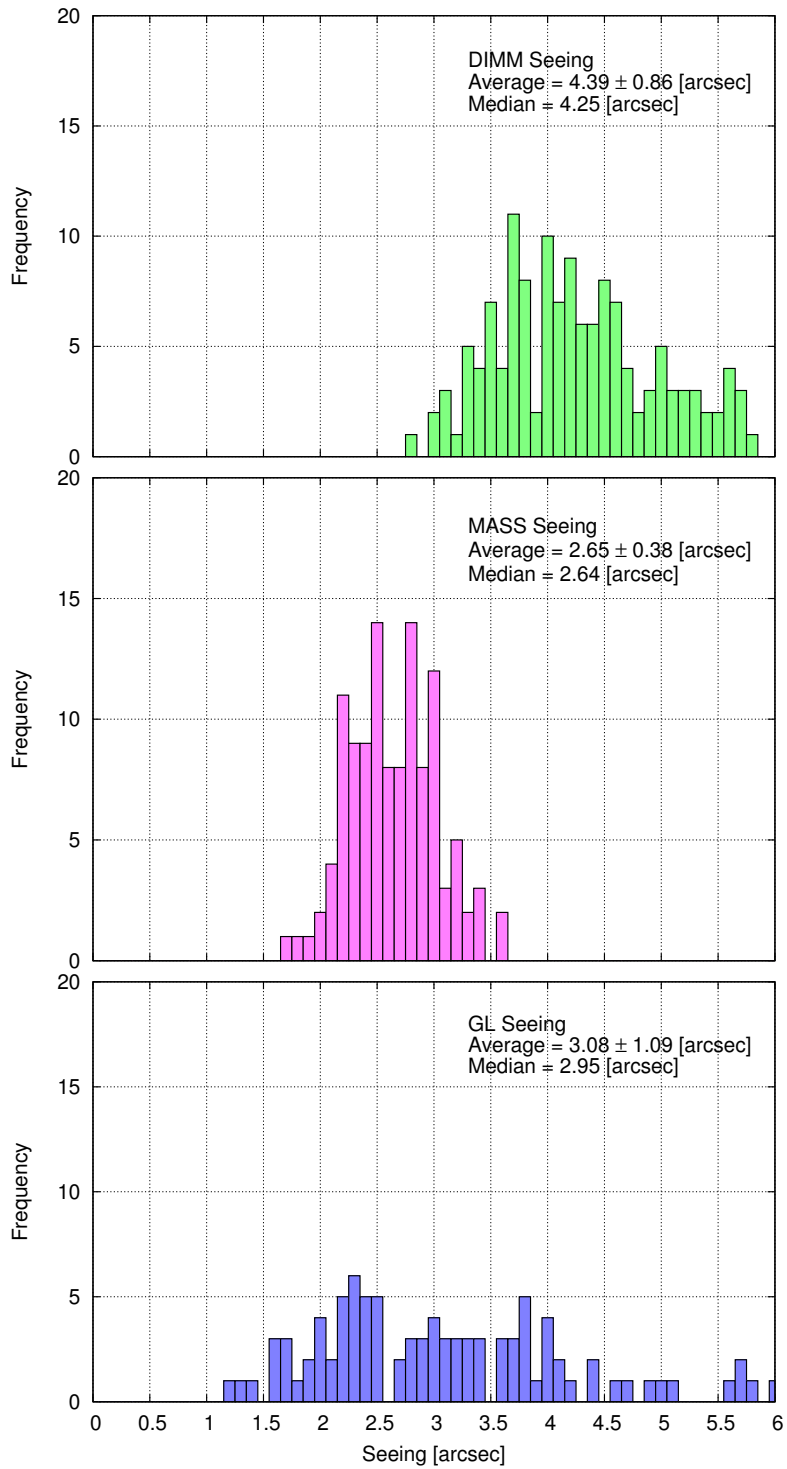


図 4.44: 2014年02月08日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.23 2014年02月12日

22時13分からぎよしや座カペラ (視等級 0.08 等)、そして 03 時 33 分からうしかい座アークトゥルス (視等級-0.04 等) を参照星にしている。この日は夕方から薄い雲が常に通過していた。00 時ごろから雲が非常に濃くなり、測定を一時中断した。04 時から覆っていた濃い雲がなくなったので、薄明開始時まで測定を再開した。

表 4.46: シーイングの平均値と中央値

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
DIMM	$1.81 \pm 0.29$	1.80
MASS	$1.13 \pm 0.27$	1.12
GL	$1.24 \pm 0.27$	1.28

表 4.47:  $C_n^2$  の平均値と中央値

高度 [km]	平均値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]	中央値 [ $\text{m}^{-\frac{2}{3}}$ ]
16	$8.94 \times 10^{-14} \pm 3.09 \times 10^{-14}$	$8.17 \times 10^{-14}$
8	$6.15 \times 10^{-14} \pm 4.87 \times 10^{-14}$	$6.22 \times 10^{-14}$
4	$7.72 \times 10^{-14} \pm 8.26 \times 10^{-14}$	$3.90 \times 10^{-14}$
2	$6.94 \times 10^{-14} \pm 6.21 \times 10^{-14}$	$5.94 \times 10^{-14}$
1	$7.64 \times 10^{-14} \pm 6.87 \times 10^{-14}$	$6.54 \times 10^{-14}$
0.5	$3.82 \times 10^{-13} \pm 2.58 \times 10^{-13}$	$3.34 \times 10^{-13}$

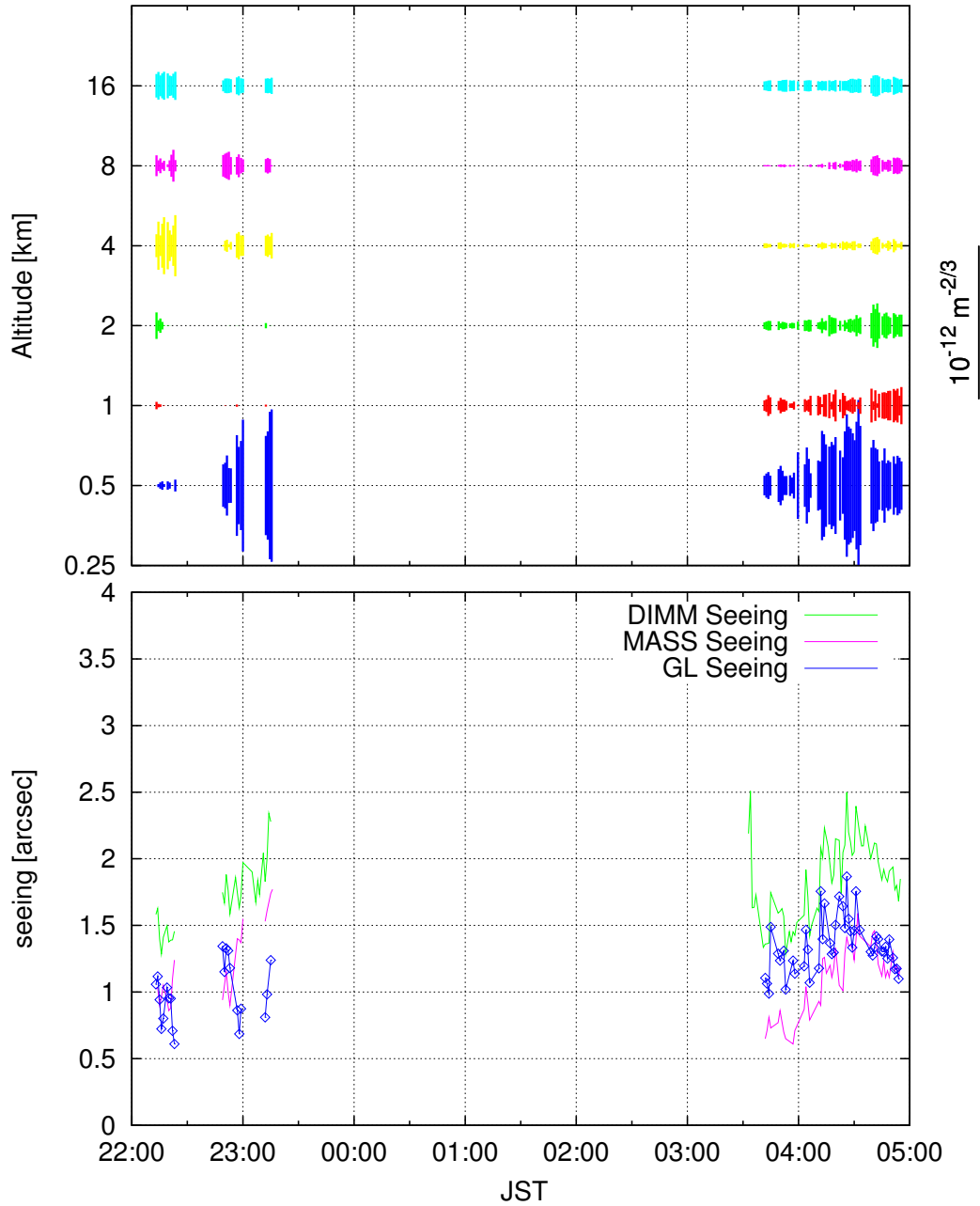


図 4.45: (上)2014 年 02 月 12 日大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km], 横軸:JST 青:0.5  $\square$ , 赤:1  $\square$ , 緑:2km, 黄:4km, 桃:8km, 水:16km) (下)シーイングの時間変動 (縦軸:Seeing[arcsec], 横軸:JST 桃線:MASS シーイング, 緑線:DIMM シーイング, 青線:GL シーイング)

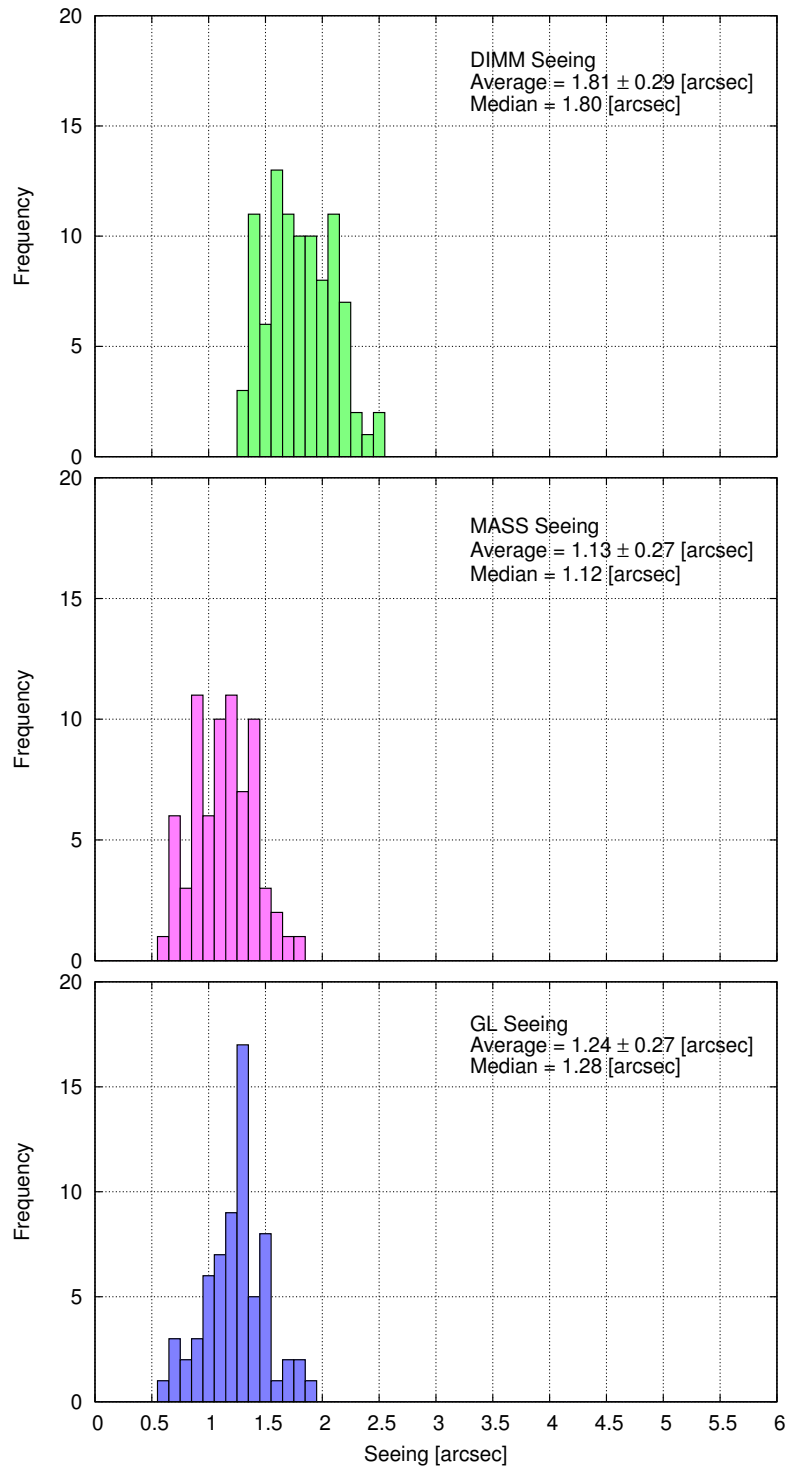


図 4.46: 2014年02月12日のシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])  
 (上)DIMM シーイング (中)MASS シーイング (下)GL シーイング

#### 4.24 MASS データの再処理

大体の測定日では、雲の通過が多く見られた。雲が通過すると星からの光が瞬時に減光されるので、シンチレーションを測定する MASS のデータに大きな影響を与えている可能性がある。よって MASS の測定されたカウント値に閾値を設定して、雲による影響を極力抑えた。

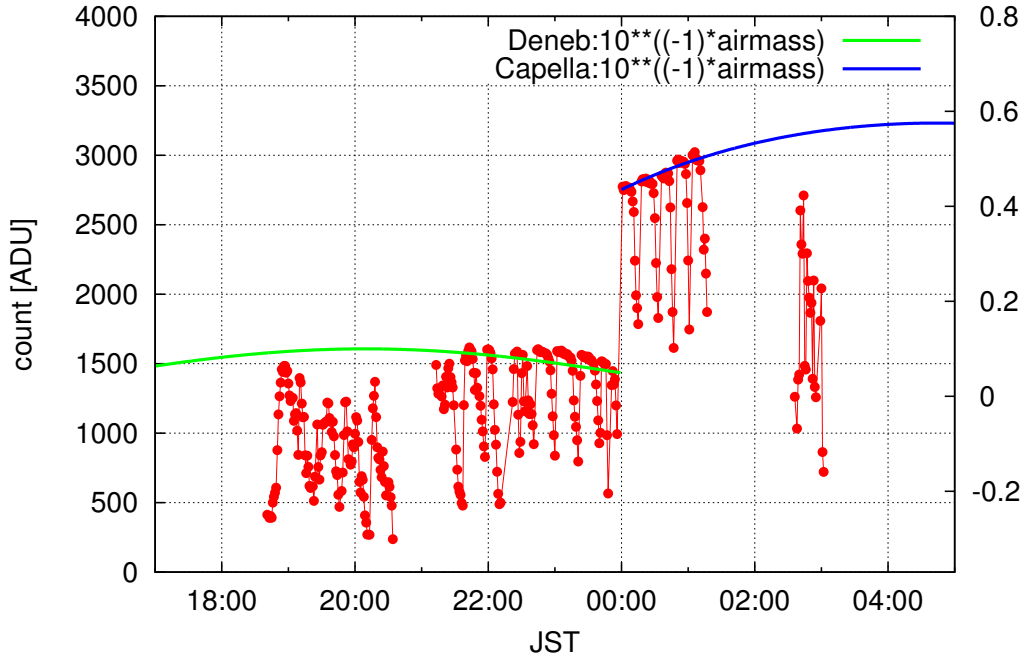


図 4.47: 09 月 21 日に MASS で測定されたカウント値 [ADU] の時間変動 (縦軸:カウント値 [ADU]、横軸:JST)

図 4.47 の赤線は 09 月 21 日に測定された MASS のカウント値の時間変動を表している。カウント値はアパーチャー A-D の測定されたフラックスの値を合計した。この日は、18 時から 00 時まではくちょう座デネブ (視等級 1.25 等)、00 時からぎょしゃ座カペラ (視等級 0.08 等) を参照星としているので、00 時辺りでカウント値が大きく変化している。また緑線はデネブのエアマスから予測されるカウント値の減少率を、青線はカペラのエアマスから予測されるカウント値の減少率である (y2 軸)。18 時 40 分から 20 時 20 分まで、また 02 時 30 分から 03 時までの測定されたカウント値は予測されるカウント値よりも小さく、雲の通過が多いことがわかる。21 時から 01 時 10 分までは雲の通過はほとんど見られないが、約 10 分の等間隔でカウント値が大きく落ち込んでいる。これは望遠鏡の結露による減光である。結露した場合はドライヤーの温風で結露を抑えた。

参照星で等級は異なるので、その日の参照星ごとに閾値を設定した。閾値の設定には、MASS で測定されたカウント値のヒストグラムを使用した。図 4.48 は 09 月 21 日に測定された参照星がデネブの時のカウント値のヒストグラムを、図 4.49 は参照星がカペラの時のカウント値のヒストグラムを表している。2 つの図に共通してヒストグラムの右側に

大きくピークの立った分布が見られ、その分布の左側から裾野が広がっている。この左側の裾野は雲による減光や望遠鏡の結露による影響だと考えられる。

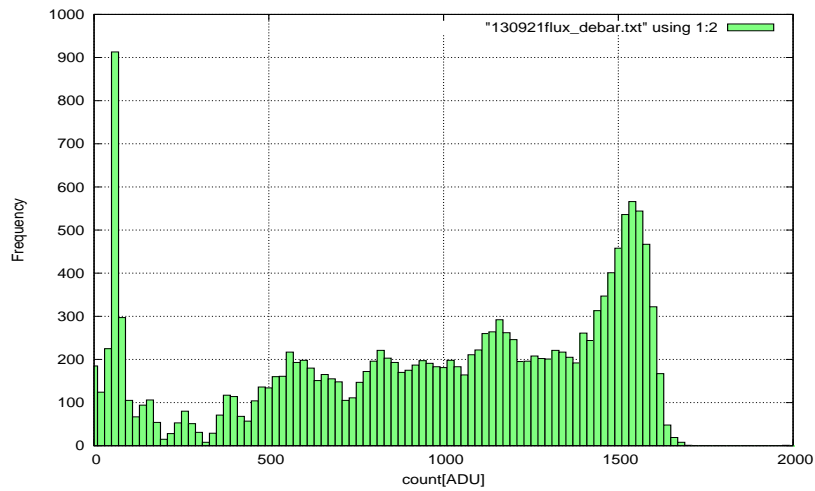


図 4.48: 09 月 21 日に測定されたカウント値 [ADU] のヒストグラム (参照星はデネブ 18:47–23:54) (縦軸:頻度、横軸:カウント値 [ADU])

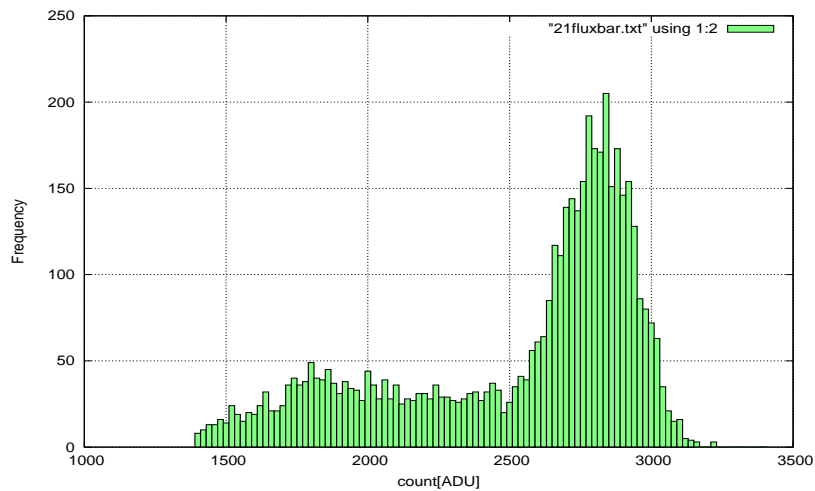


図 4.49: 09 月 21 日に測定されたカウント値 [ADU] のヒストグラム (参照星はカペラ 24:02–26:59) (縦軸:頻度、横軸:カウント値 [ADU])

閾値の設定には、この右側の分布に着目した。まずピークから右側の裾野までと同じ間隔をピークから左側にとり、そのピークを中心とした左側から右側までの範囲で標準偏差  $\sigma$  を計算する。そしてピークから左側に  $4\sigma$  位置しているカウント値を閾値とした。通常正規分布は  $3\sigma$  で 99.7% を得るが、シーイングの変動のためにこの分布が正規分布とは限らず、またピークの左側と右側で対称であるかどうかもわからない。また閾値を高くすればするほど MASS の測定結果は良くなるので、大きく見積もって  $4\sigma$  にした。また厳密にエアマスによる大気の減光もあるが、雲や結露による減光の方が非常に大きく天頂付近の恒星を測定対象としているので、この閾値の設定では無視している。

09月21日ではデネブで 968[ADU]、カペラで 2313[ADU] を閾値とした。表 4.48 には、再処理した MASS シーイングの値が記載されている。シーイングの値は参照星ごとに行っている。閾値よりも高いカウント値で測定されたシーイングは良い、閾値よりも低いカウント値が含まれているシーイングは悪いと表現する。表からは、デネブとカペラの両方で明らかなシーイングの平均値の改善が見られるので、雲などによる減光は MASS の測定結果に大きな影響を与えていることが明らかになった。

表 4.48: 09月21日の再処理後の MASS シーイング (閾値よりも高いカウント値で測定されたシーイングは良い、閾値よりも低いカウント値が含まれているシーイングは悪いとする。)

シーイング	平均値 [arcsec]	中央値 [arcsec]
デネブ (良い)	$0.69 \pm 0.15$	0.68
デネブ (悪い)	$0.96 \pm 0.50$	0.88
カペラ (良い)	$0.80 \pm 0.17$	0.79
カペラ (悪い)	$1.46 \pm 0.76$	1.35

また再処理する前の乱流プロファイルと再処理した後の乱流プロファイルは図 4.50 と図 4.51 で見られる。両図を比較すると、特に高度 0.5km で見られる突発的な乱流強度の増大が無くなっていることが分かる。



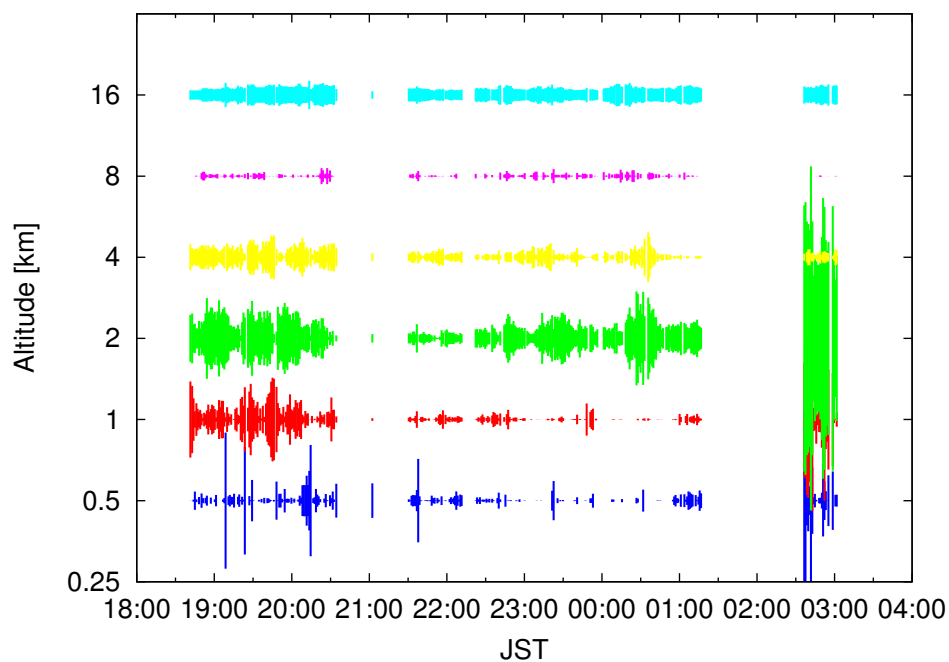


図 4.50: 再処理前の 09 月 21 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km]、横軸:JST)

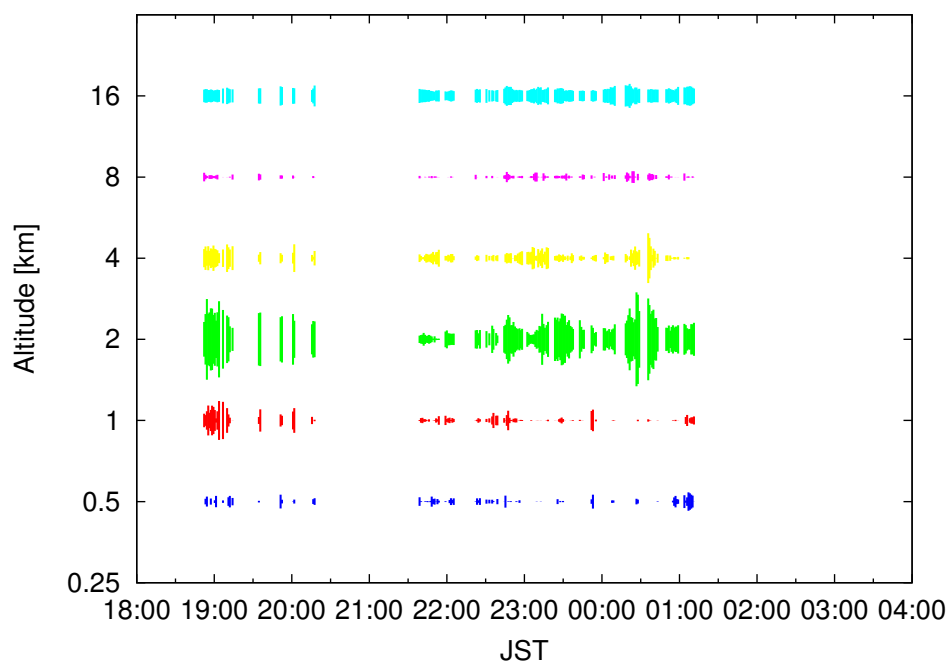


図 4.51: 再処理後の 09 月 21 日の大気擾乱高度プロファイル (縦軸:高度 [km]、横軸:JST)

#### 4.25 MASS-DIMM 測定のおとめ

本研究では、MASS-DIMM を使って天文台上空の大気擾乱高度プロファイルの測定を行った。その結果 2013 年 09 月-2014 年 02 月の観測で、計 23 日のデータを取得することができた。表 4.49 に測定した MASS シーイング、DIMM シーイング、GL シーイングの全データの中央値を記載する。また日ごとのシーイングの時間変動のグラフを図 4.52 に記載する。

表 4.49: 全シーイングデータの中央値 ["]

	中央値 ["]
DIMM シーイング	2.13
MASS シーイング	1.12
GL シーイング	1.54

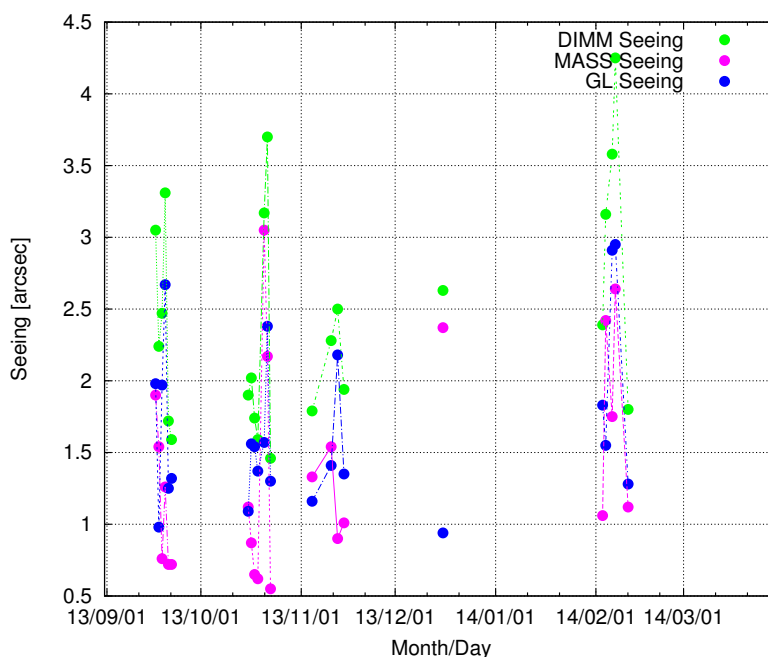


図 4.52: 日ごとのシーイングの時間変動 (縦軸:シーイング [arcsec]、横軸:月/日)

天文台では 2010 年に 14 回の DIMM によるシーイング測定が行われている。その時の結果は、Median=1.77"であった。その過去データと今回の測定結果を比較すると、今回の測定で得られたシーイングは大きく見積もられた。GL シーイングの Median は 1.54"であり、(2.2) 式から DIMM シーイングとの乱流強度の比が  $J_{GL}/J_{DIMM} \sim 0.52$  であることが求められる。よって今回の測定では、天文台上空の大気揺らぎの 52% が接地層に集中しており、GL の補正だけで 2.13" から 1.12" までのシーイングの改善が期待できる。

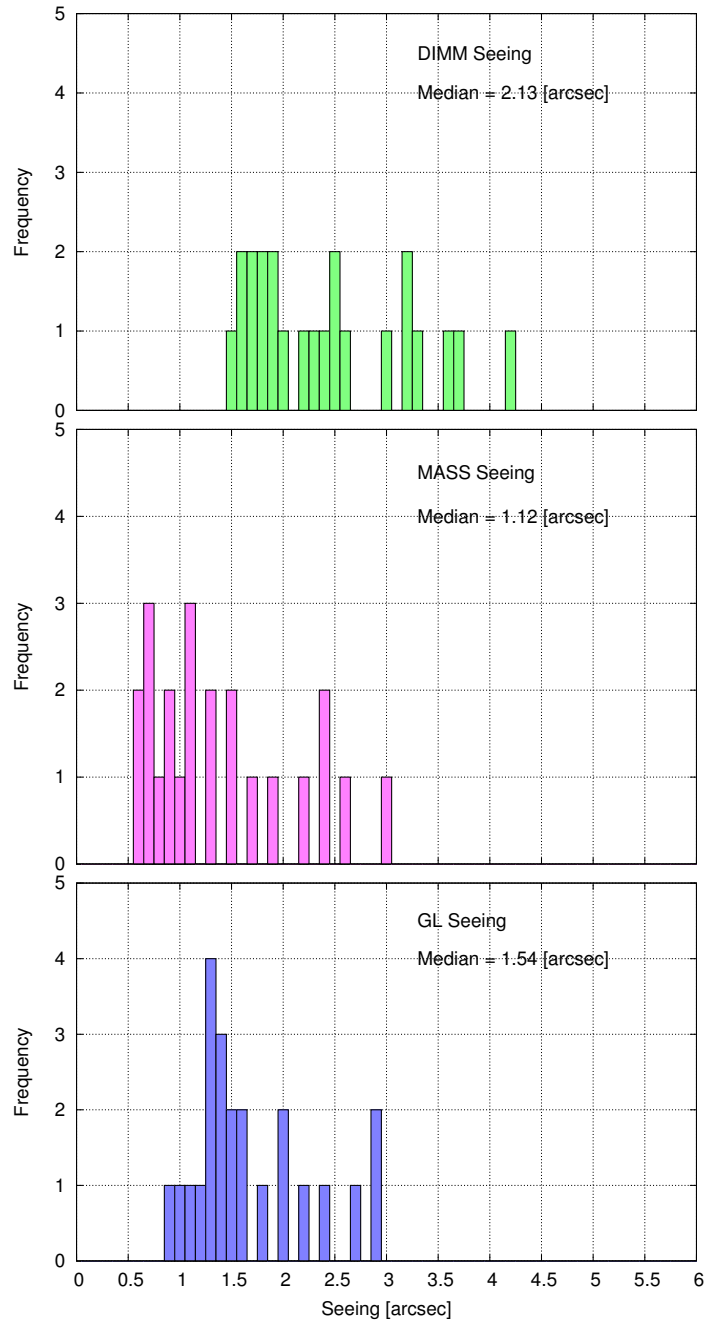


図 4.53: 日ごとのシーイングヒストグラム (縦軸:頻度、横軸:シーイング [arcsec])

次のグラフ (図 4.54) は、測定した  $C_n^2$  の 1 日ごとの中央値を、高度ごとにプロットしたものである。また図 4.54 の日ごとの  $C_n^2$  の中央値を求め、表 4.50 に示し、表 4.50 と表 4.49 の結果から、高度ごとの大気揺らぎの比率を表 4.51 にまとめた。接地層に全大気揺らぎの半分が集中している結果とこの結果から、高度 0.5km は天文台上空の全大気揺らぎの 17% を、高度 2km が 16% を占めていることが明らかになった。

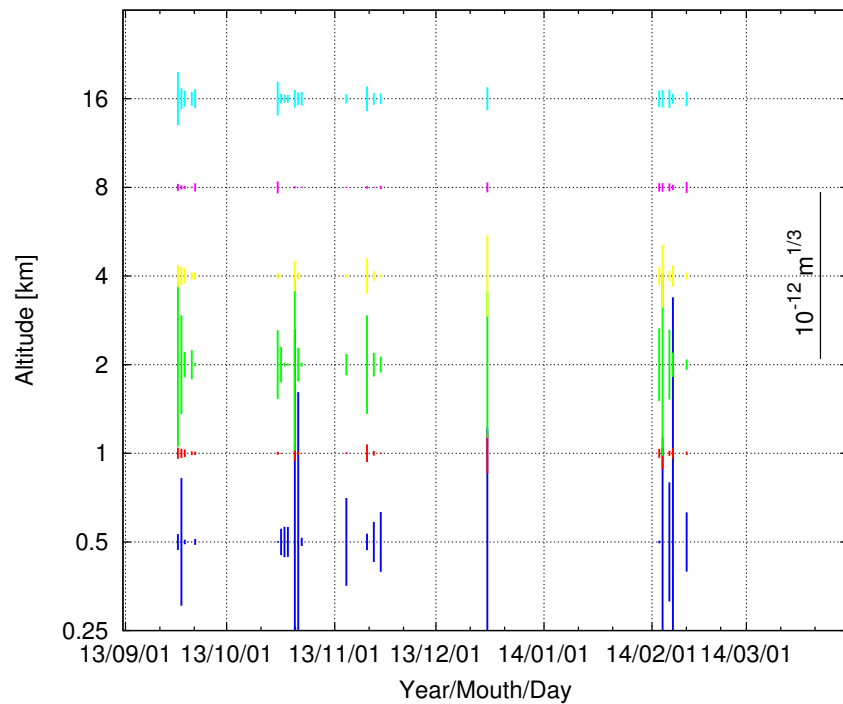


図 4.54: 日ごとの大気擾乱高度プロファイルの変動 (縦軸:高度 [km]、横軸:月/日)

表 4.50: 全測定日の  $C_n^2$  の中央値 [ $\text{m}^{-2/3}$ ]

高度 [km]	中央値 [ $\text{m}^{-2/3}$ ]
16	$8.17 \times 10^{-14}$
8	$1.54 \times 10^{-14}$
4	$4.28 \times 10^{-14}$
2	$1.65 \times 10^{-13}$
1	$2.48 \times 10^{-14}$
0.5	$1.72 \times 10^{-13}$

表 4.51: 高度ごとの大気揺らぎの比率

高度 [km]	大気揺らぎの比率
GL-16	1.00
16	0.78
8	0.01
4	0.04
2	0.16
1	0.02
0.5	0.17
GL	0.52

GLの大気揺らぎの09月から02月の平均的な寄与は52%であったが、GL大気揺らぎの寄与を月ごとにプロットしてみると非常に寄与が変動していることが明らかになった(図4.55)。GLの寄与が3割を切っている日もあり、この図からGLの補正のみではほとんど

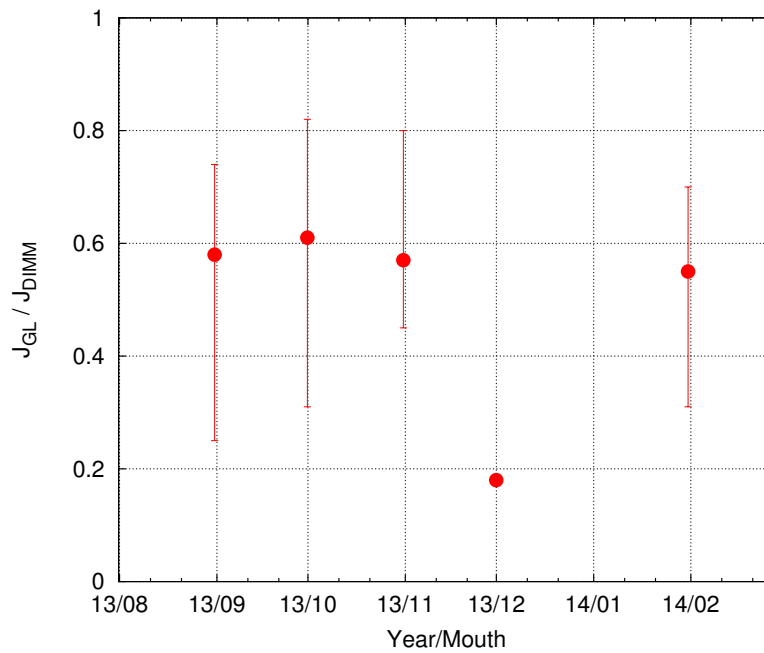


図 4.55: 月ごとの GL 大気揺らぎの寄与の変動 (縦軸:全大気揺らぎ中の GL 大気揺らぎの比率、横軸:年/月) 月ごとのデータ点が少ないので赤点は平均、エラーバーは最大最小で表している。

改善されない日もあることがわかった。

## 5 まとめ・今後の課題

今回の測定では開発中の補償光学系の構成の検討のために、2013年09月から2014年02月にかけて MASS-DIMM の測定を行った。その結果 09-02月の平均的な大気擾乱高度プロファイルから、天文台上空の全大気揺らぎの52%が地表面付近に、17%が高度0.5kmに、16%が高度2kmに集中していることが分かり、高度ごとの典型的な大気揺らぎの割合を求めることができた。また GL 大気揺らぎは月ごとで大きく変動しており、GLの補正のみではシーイングがほぼ改善できない日もあることが明らかになった。以上のことから補正視野50”にわたって可視光0.5  $\mu\text{m}$ で0.4”のシーイングの改善を目標とする開発中の補償光学系の構成は、GLの大気揺らぎの補正に比重をかけたMCAOが適切だと考えられる。

今後の課題としては03月以降も観測を行い、最終的には今回の測定データを含めた1年分のデータを使って、典型的な名寄の大気擾乱高度プロファイルを求めたい。そのプロファイルは将来の補償光学系の性能の見積もりにおいて重要なパラメータになる。そして補償光学系の性能の検討に着手したいと考えている。

## 6 付録 A

本研究に当たって、変更した MASS-DIMM の部品の製図をここに記載する。

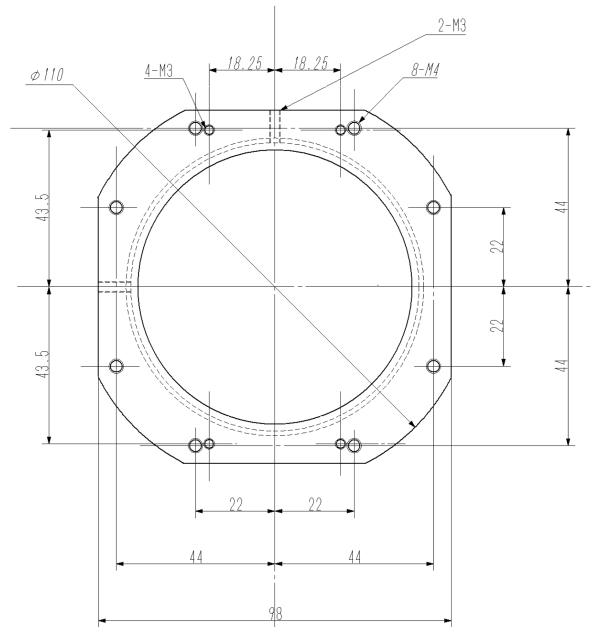


図 6.1: Mount ring (ME02A)

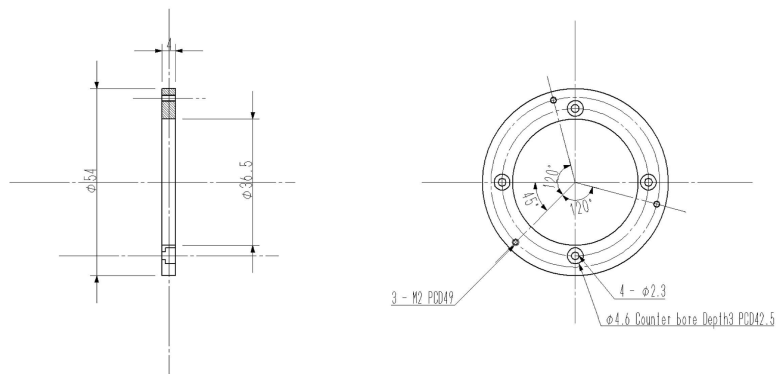


図 6.2: ME02A のアダプター

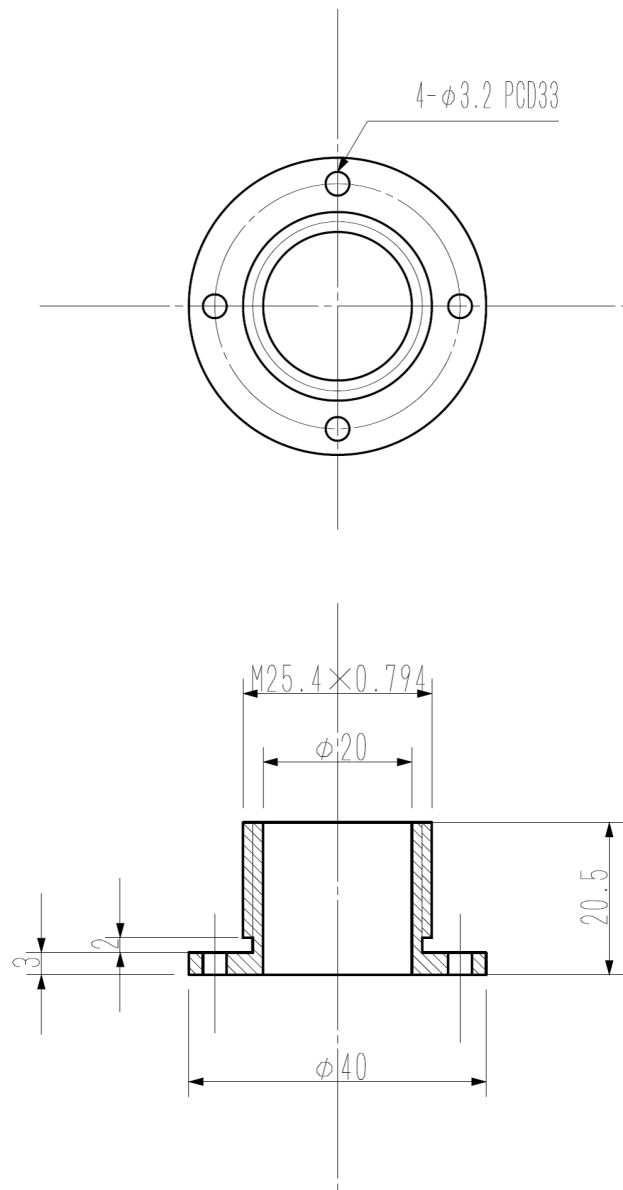


图 6.3: C-mount Camera interface (ME01G)

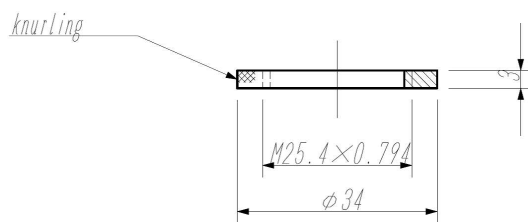


图 6.4: Retainer ring (ME01H)



## 謝辞

指導教官である渡部重十先生には、サイエンスケースを考えるにあたって懇切丁寧に指導して下さいました。

渡辺誠特任助教には、大変興味深い研究テーマを与えて頂きました。また測定の準備や測定につきあって頂いたり、毎週のミーティングでは研究に対するアドバイスを多く頂きました。私がこうして卒業論文を書き上げることができたのは、渡辺先生のおかげです。本当にありがとうございました。

国立天文台ハワイ観測所の大屋真氏には、本研究で使用した装置の手配で大変お世話になりました。またゼミやミーティングで、多くの研究に対するアドバイスを頂きました。

名寄市立天文台の職員の方々には、観測期間中の生活において多大なご支援を頂きました。また私が名寄に不在中の間、代わりに観測場所の雪かきをして頂きました。

観測組の皆様には、観測装置の使い方や解析手法など多くの技術を教えて頂きました。さらには天文台の雪かきまで大変お世話になりました。

惑星宇宙グループ探査観測ユニットの皆様には、セミナーを通じて多くのアドバイスを頂きました。セミナーでの活発な議論で、多くの刺激と示唆を得ることができました。

惑星宇宙グループに所属する教員、研究員、先輩、同期、秘書の方々には、この1年の研究生活を支えて頂きました。

本研究を進めるにあたりご支援を頂いた皆様に、この場を借りて感謝の意を表させていただきます。

## 参考文献

- [1] Watanabe, M., Y. Takahashi, M. Sato, S. Watanabe, T. Fukuhara, K. Hamamoto, A. Ozaki, "MSI: a visible multispectral imager for 1.6-m telescope of Hokkaido University," SPIE, 8446, 84462O-10, 2012
- [2] Perez-Hoyos, S., J. F. Sanz-Requena, N. Barrado-Izagirre, J. F. Rojas, A. Sanchez-Lavega, IOPW Team, "The 2009-2010 fade of Jupiter's South Equatorial Belt: Vertical cloud structure models and zonal winds from visible imaging," *Icarus*, 217, 256-271, 2012
- [3] Sarazin, M., F. Roddier, "The ESO differential image motion monitor," *Astronomy and Astrophysic*, 227, 294-300, 1990
- [4] Tokovinin, A., "Differential Image Motion to Seeing," *PASP*, 114, 1156-1166, 2002
- [5] Kornilov, V., A. Tokovinin, N. Shatsky, O. Voziakova, S. Potanin, B. Safonov, "Combined MASS-DIMM instruments for atmospheric turbulence studies," *MNRAS*, 382, 1268-1278, 2007
- [6] Kornilov, V., S. Potanin, N. Shatsky, B. Safonov, O. Voziakova, "ELT MASS/DIMM instrument for atmospheric turbulence measurements. Optical and mechanical design. Alignment," 2007
- [7] Kornilov, V., N. Shatsky, O. Voziakova, "MASS Software Version 2.04 User Guide," 2003
- [8] Davies, R., M. Kasper, "Adaptive Optics for Astronomy," 2012
- [9] Robert, K., "Introduction to adaptive optics," 2000
- [10] Tokovinin, A., "Measurement of seeing and the atmospheric time constant by differential scintillations," *Applied Optics*, 41, 6, 957-964, 2002