

# MASS-DIMMによる名寄の大気擾乱高度プロファイルの測定(2)

合田周平; 渡辺誠; 仲本純平[1]; 大屋真[2]

[1] 北海道大学; [2] 国立天文台

## Abstract

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、木星サイズ程度の視野(約50秒角)で可視光で約0.4秒角の分解能の達成をするために、多層共役補償光学系(MCAO)の構成を検討している。MCAOの可変形鏡の最適な共役高度を決定するために、2013年9月からMASS-DIMMを用い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てきた(合田他:2014年春季天文学会)。2014年10月までの約1年間の測定結果から、名寄のシーイングは中央値で2.01秒角であり、全大気揺らぎの51%が地表層に、17%が高度0.5kmに、15%が高度2kmに、残り15%が高度4-16kmに存在していることが明らかになった。半分以上が地表層に集中しており、他サイトと似た結果が得られた。

更に自由大気揺らぎ以外のAOで補正すべき波面誤差の大きさを見積もるために、ピリカ望遠鏡の可視スペクトル撮像装置MSIとMASS-DIMMでシーイングの同時測定を行い、ドーム及び望遠鏡シーイングの見積もりを行った。その結果として、ドーム内外の気温差が0-5°C、ミラー温度とドームの気温差が1-5°Cの時、ドーム及び望遠鏡シーイングはそれぞれ0-4.2", 0-3.3"であることが明らかになった。また望遠鏡シーイングには望遠鏡収差も含まれているので、シャックハルトマンセンサーを用いて望遠鏡収差を測定したところ、RMS値で290nmであることが明らかになった。

## 1. Introduction

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**の開発を行っている。性能は、木星の視直径サイズの視野(約50")で、0.5μmより長波長側で約0.4"の分解能を達成を目標としている。

本補償光学系では多層共役補償光学系(MCAO)の構成を検討しており、補正視野の拡大を試みる。MCAOは、複数の波面センサーで大気揺らぎの3次元推定を行い、特定の高度に共役な複数の可変形鏡で補正する。従ってMCAOの構成を検討するためには、サイトの高度ごとの大気揺らぎの統計情報が必要となる。

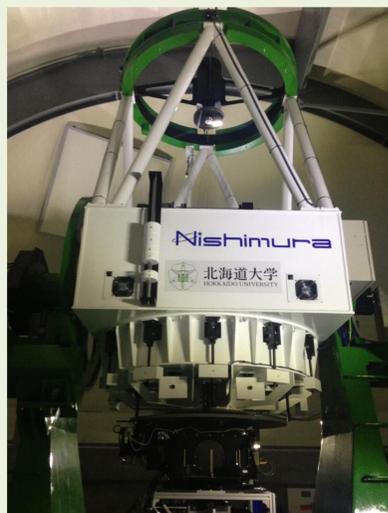


図1.2 1.6 mピリカ望遠鏡

北海道大学・大学院理学研究院・附属天文台  
東経 +142:28:58.0, 北緯 +44:22:25.1,  
標高 161m

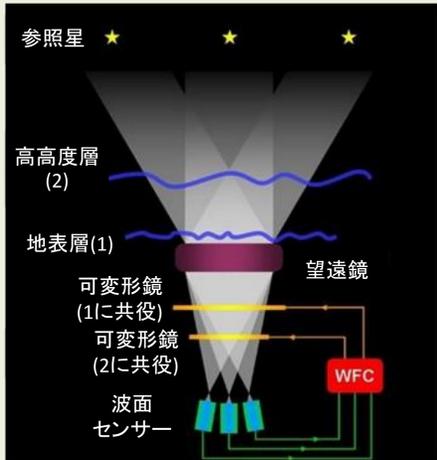


図1.1 MCAO [Richard and Markus, 2007]

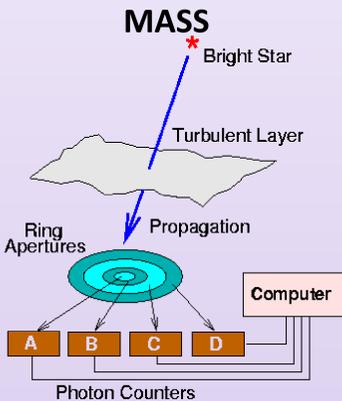
また可変形鏡に必要なストロークを見積もるために、大気揺らぎと望遠鏡収差の波面誤差、ドーム及び望遠鏡シーイングの測定が必要となる。

本研究では、MASS-DIMM(Multi-Aperture Scintillation Sensor and Differential Image Motion Monitor)を使用して、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。可変形鏡のストロークを見積もるために、ピリカ望遠鏡の可視スペクトル撮像装置MSIとMASS-DIMMでシーイングの同時測定を行い、ドーム及び望遠鏡シーイングの見積もりを行った。またシャックハルトマンセンサーを用いて、大気揺らぎと望遠鏡収差の波面誤差の測定を行った。

## 2. Instrument

### ・MASS-DIMM

MASS-DIMMは、地表層を含む7つの高度(0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16km)の大気揺らぎの強さ( $C_n^2$ )を測定する装置であり、MASSとDIMMの2つの装置で構成される。



[http://www.ctio.noao.edu/~atokovin/profiler/index.html]  
シンチレーションの空間スケールは、伝搬距離によって変化する。よって恒星のシンチレーションをサイズの異なる複数のアパーチャーで測定することで、高度ごとの $C_n^2$ を求める。ただし伝播距離がほぼ0である地表層(GL)の大気揺らぎは測定できない。

MASS シーイング、及びGLシーイングは以下のように計算できる。

$$\text{MASS Seeing} \propto (\int C_n^2 dh)^{3/5} \quad \text{GL Seeing} = (\text{DIMM Seeing}^{5/3} - \text{MASS Seeing}^{5/3})^{3/5}$$

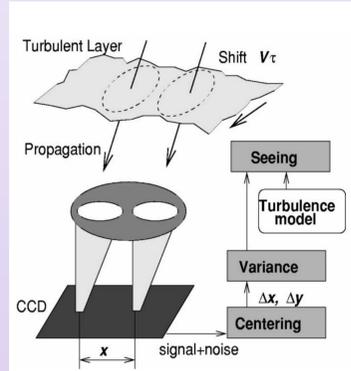
### ・シャックハルトマン波面センサー

ピクセルスケール: 0.31"/pix  
サブアパーチャー数: 11×11  
サブアパーチャーサイズ: 14.4[cm] = 20[pix]

回折限界: 3.95[pix]  
視野: 6.2["]  
フィルター: <550nmをカット

	製品名	メーカー	Pixサイズ	最大フレームレート
CCD	GE-680	Allied vision	7.5μm	350Hz
	製品名	メーカー	レンズ直径	焦点距離
マイクロレンズアレイ	MLA150-5C	Thorlabs	150μm	5.2mm

### DIMM



[A.Tokovinin, 2002]

1つの星を2つの離れた開口を通して観測した時の2つの星像の相対的な重心揺らぎから、シーイング(FWHM)を測定する。DIMMで測定されるシーイングは、ナチュラルシーイングである。

## 3. Results

### 大気擾乱高度プロファイル

2013年9月から2014年10月の観測で計45日のデータを取得した。

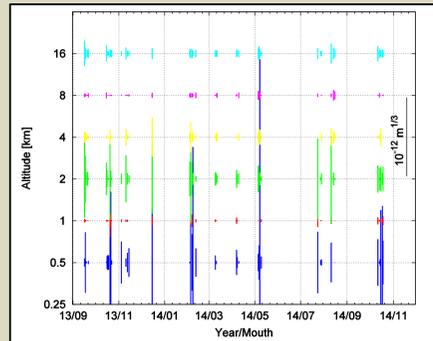


図3.1 日毎の大気プロファイルの変動

高度	大気揺らぎの比率[%]
16km	8.4
8km	1.6
4km	5.3
2km	14.9
1km	2.5
0.5km	16.8
GL	50.6
GL-16km	100

表3.2 高度ごとの大気揺らぎの比率  
(16kmより上空は大気揺らぎがないと仮定)

DIMM	median=2.01" ± 0.76"
MASS	median=1.12" ± 0.74"
GL	median=1.34" ± 0.53"

表3.1 全測定日のシーイングの中央値

### ドーム・望遠鏡シーイング

ドーム内とドーム外の温度差を $\Delta T_d$ 、望遠鏡ミラーとドーム内の温度差を $\Delta T_m$ とすると、望遠鏡で測定されるシーイング $\epsilon$ は以下のように表される。 $(\epsilon_0$ はナチュラルシーイング、 $\alpha_d$ と $\alpha_m$ は係数[ $^{\circ}\text{C}^{-1.2}$ ])

$$\epsilon^{5/3} = \epsilon_0^{5/3} + (\alpha_d \Delta T_d^{1.2})^{5/3} + (\alpha_m \Delta T_m^{1.2})^{5/3}$$

$\alpha_d \Delta T_d^{1.2}$ はドームシーイング、 $\alpha_m \Delta T_m^{1.2}$ は望遠鏡シーイングである。 $\epsilon_0$ はMASS-DIMMで測定することができるので、ピリカ望遠鏡のMSIで $\epsilon$ を測定して $\alpha_d$ と $\alpha_m$ を求めた。

2014年5月と10月に同時測定を行った。測定対象はMASS-DIMMと同じ対象を使用した。またMASS-DIMMで使用しているCCD(GE-680)の感度中心波長は約500nmなので、フィルターはMSIの液晶波長可変フィルター(LCTF)を500nm波長に改変した。(バンド幅は約10nm)

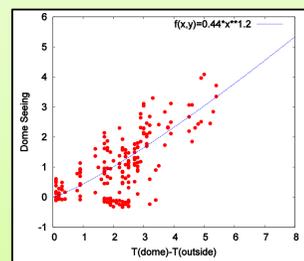


図3.2 ドームシーイング

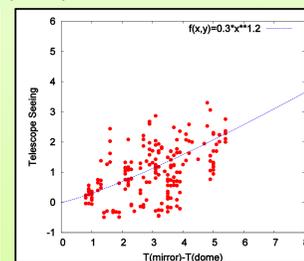


図3.3 望遠鏡シーイング

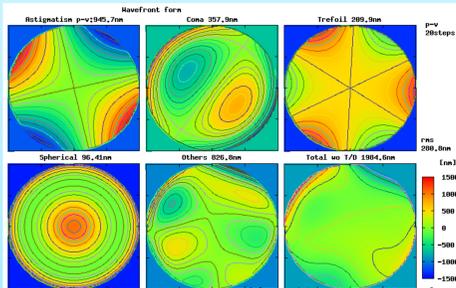
ドーム内外の気温差が0-5°C、ミラー温度とドームの気温差が1-5°Cの時、ドーム及び望遠鏡シーイングはそれぞれ0-4.2", 0-3.3"となった。

ドームシーイング:  $0.44\Delta T_d^{1.2}$ ["]  
望遠鏡シーイング:  $0.30\Delta T_m^{1.2}$ ["]

### 望遠鏡収差、大気揺らぎの波面誤差

2015年2月にシャックハルトマン波面センサーを用いて測定を行った。測定中は望遠鏡のロータータ角を0度に固定した。フレームレートは350Hzである。

総露出時間が2分となるような測定を計19回行った。1測定ごとに取得した画像を重ね合わせて、シーイング成分をキャンセルした。27次のツェルニケ係数まで求めて、19個の測定データの各次数の平均値を望遠鏡収差として見積もった。



RMS値で約290nm, P-V値で約2000nmであることが分かった。

望遠鏡収差を差し引いて、大気揺らぎの波面誤差を求めた。(測定前のシーイングは1.8")

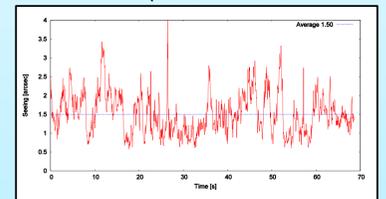


図3.4 波面誤差から求めたシーイング値

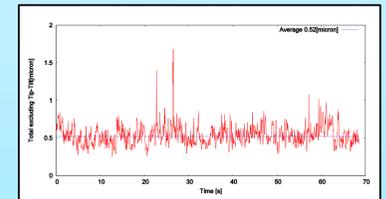


図3.5 Tip-Tiltを除いた波面誤差のRMS値

Tip-Tiltを除いた波面誤差のRMS値の平均は0.52μmであった。シーイング1.5"の波面誤差のRMS値(TipTilt除く)はKolmogorov乱流を仮定すると0.44μmであり、0.08μmの差があった。値が合わない原因として、アウトースケールの大きさを考慮してないからだと考えている。

## 4. Conclusions & Future Work

MASS-DIMMを使用して、名寄の1年間の平均的な大気プロファイルを測定することができた。今後は今回得られた大気プロファイルを使い、可変形鏡の共役高度を決定する。

ピリカ望遠鏡のドームシーイングと望遠鏡シーイングは、それぞれ $0.44\Delta T_d^{1.2}$ 、 $0.30\Delta T_m^{1.2}$ 秒角であり、ドームシーイングの寄与の方が大きいことが明らかになった。またシャックハルトマンセンサーを使用して望遠鏡収差と大気の波面誤差を測定できたが、Tip-Tiltを除いた時の波面誤差の大きさが理論値と異なっていた。今後は測定で得られた望遠鏡の収差成分と大気揺らぎ成分から、可変形鏡に必要なストローク量を見積もる。