

木星面模様を利用した波面測定実験



合田周平 渡辺誠(北海道大学) 大屋真(国立天文台)

惑星用大気揺らぎ補償光学系の開発

北大1.6mピリカ望遠鏡に搭載するための、
太陽系惑星用大気揺らぎ補償光学系の開発を行っている。

科学的要求

- ・太陽系惑星のグローバルスケールな気象現象の解明のためには、
長期間(数週間-数年)に及ぶ**モニタリング観測**が必要
- ・木星などでは、ゾーン-ベルトの縞構造、大赤斑、東西風ジェットなどの
惑星規模の気象現象の生成メカニズムの解明のために、
木星の積乱雲を**1000kmスケール**で分解できる解像度が必要

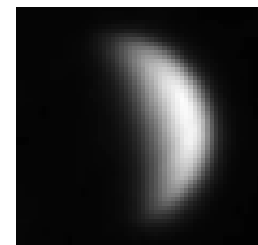
補償光学の目標性能

- ・**可視光0.5 μ mよりも長波長側**で、木星の最大視直径程度の視野(**50''**)に渡り
0.4秒角程度の分解能で長期モニターが可能なシステム

惑星用大気揺らぎ補償光学系の開発

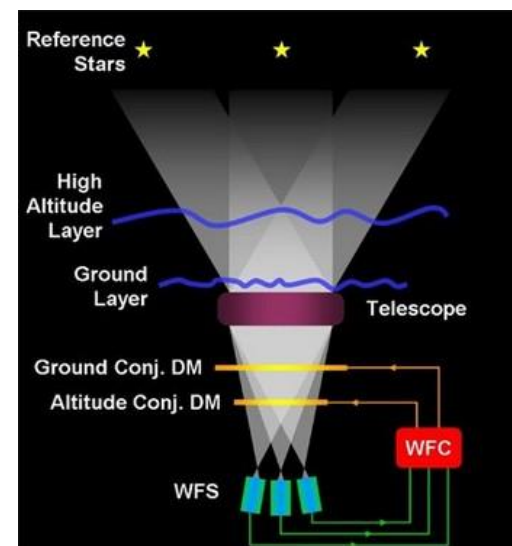
波面測定

- ・惑星面上で常に波面測定を可能にするために、**惑星自身を波面参照源**とする。
- ・木星や土星などの場合は、惑星模様を使った**Correlation Tracking**法を検討
- ・金星などコントラストの低い対象は、曲率方式を使った低次ゆらぎの検討



波面補正

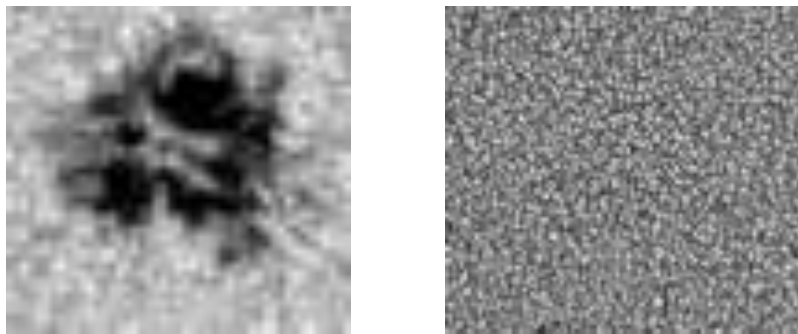
- ・**複数の波面センサ**を惑星面上の任意の点に並べ、共役高度の異なる**複数の可変形鏡**を用意し、補正視野を広げる。(MCAO)



[Richard and Markus, 2007]

面光源の波面測定

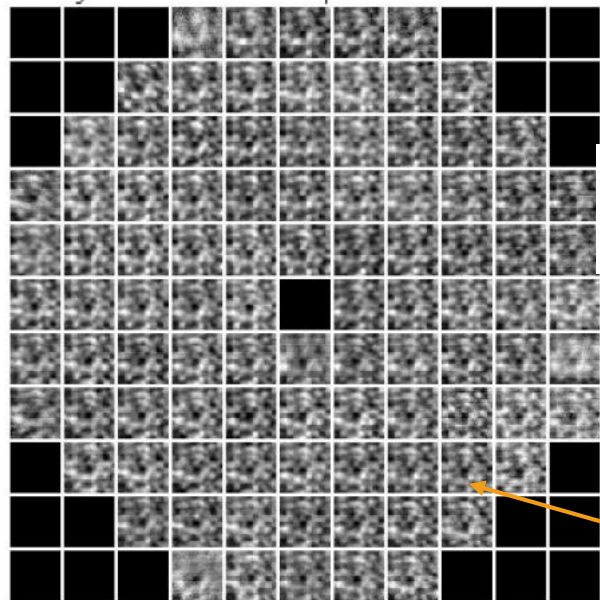
木星の場合、太陽AOと同じようにCorrelation Trackingを使用する。



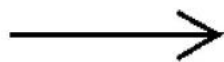
(左)黒点 (右)粒状斑

[Rimmele and Marino, 2011]

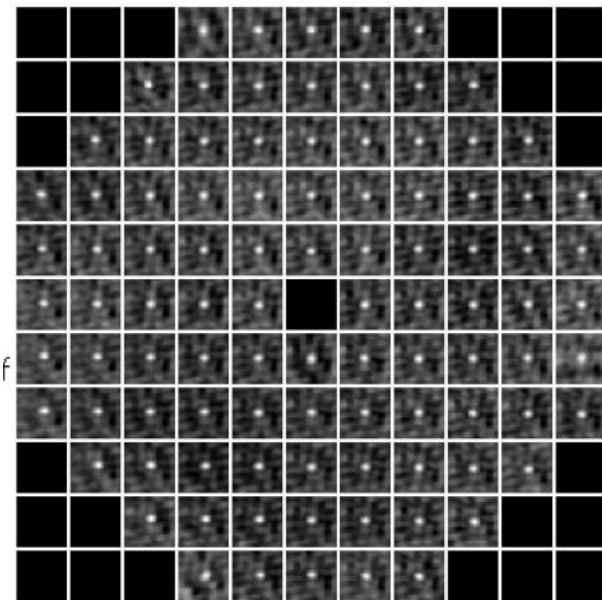
Array of subaperture images



compute cross-correlations



2-d Crosscorrelations



Solar
Granulation
Image

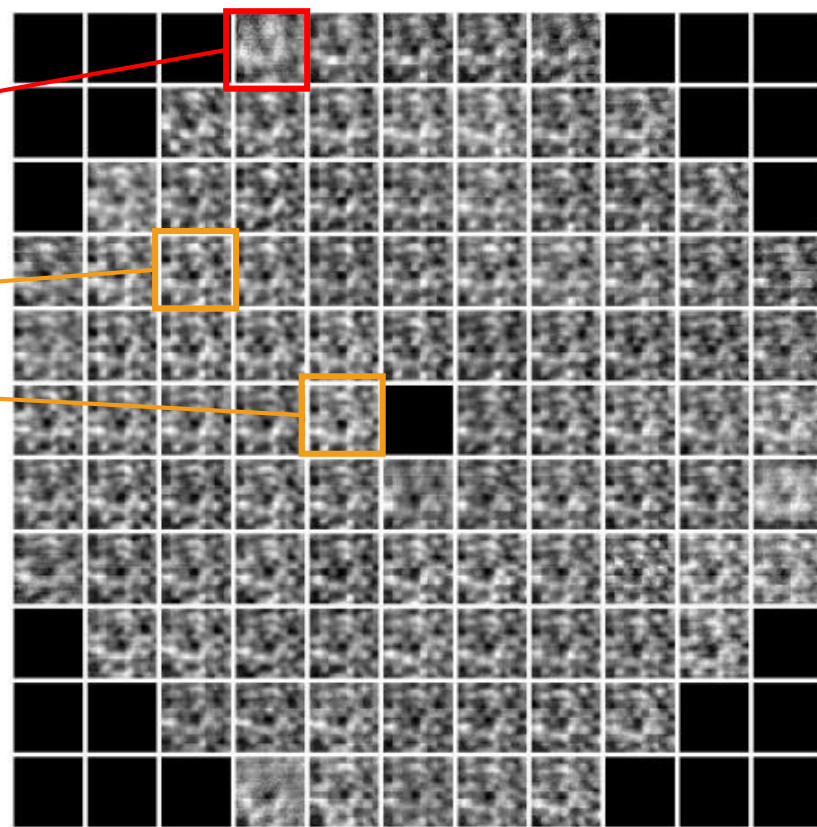
面光源の波面測定

相互相関関数 $C(x, y) = \int_{D_c} I(x_i, y_i) R(x_i + x, y_i + y) dx_i dy_i$

D_c 積分領域

$R(x, y)$...リファレンスイメージ

$I(x, y)$...インプットイメージ



面光源の波面測定

Correlationを使った時の波面測定誤差は以下のように表される[Thomas et al, 2006]

$$\sigma_{x,corr}^2 = \frac{4\delta^2 N_r^2}{N_{ph}^2}$$

Nr... 読み出しノイズ

(リファレンスイメージは読み出しノイズないと仮定)

Nph... (模様 of) フォトン量

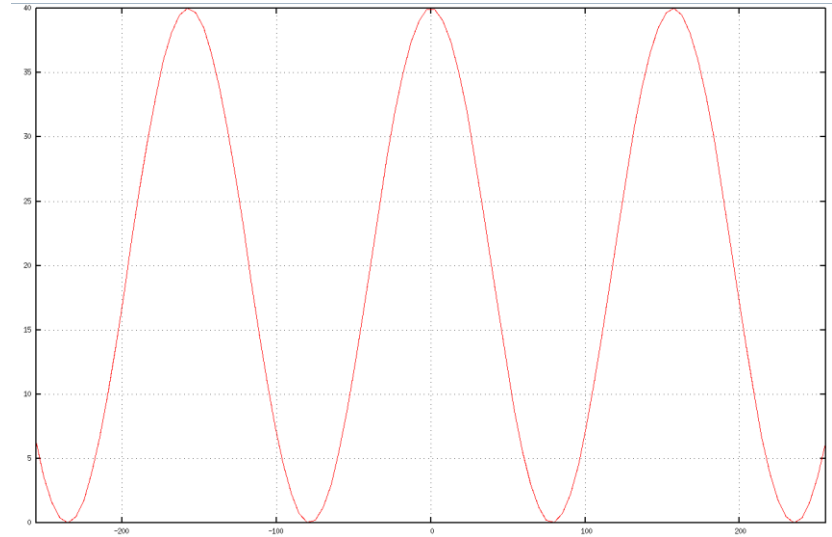
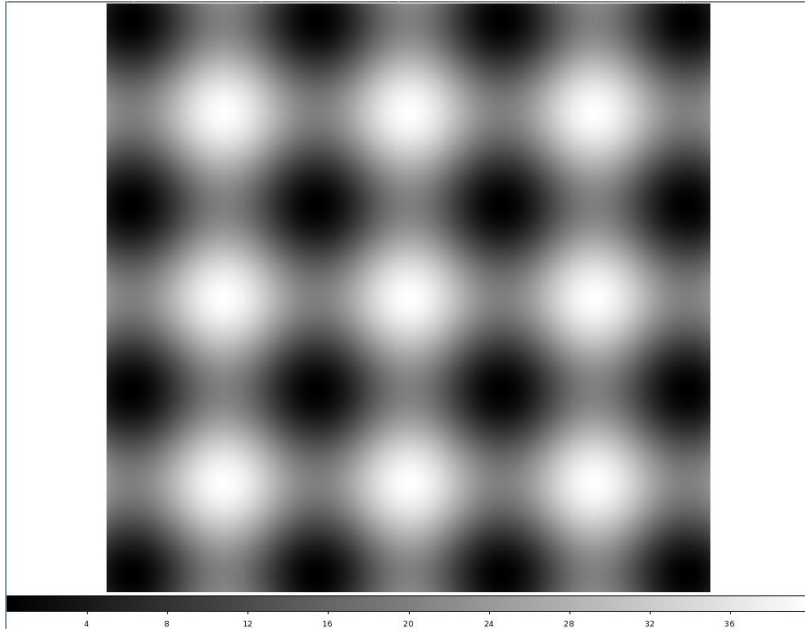
δ ... リファレンスイメージの自己相関関数のFWHM

↑※上記の式は、ガウシアンスポットを仮定

広がったオブジェクトにCorrelation法を使った時はどうなる?

面光源の波面測定

cos波を並べて、広がったオブジェクトを表現 $P(x, y) = b(\cos\left(\frac{x}{a}\right) + \cos\left(\frac{y}{a}\right) + 2)$



Thomas et al,と同じ計算方法で波面測定誤差を計算

$$\sigma_{x,corr}^2 = \frac{1}{n} \frac{7.3\delta^2 N_r^2}{N_{ph}^2} \quad (n \text{ は } \cos \text{ スポットの個数})$$

模様(スポット)の形状による違いは係数のみ($7.3\delta^2$) コントラストは δ^2 に効いてくる

1. フォトン数 2. コントラスト 3. 模様の形状 の3つが重要?

面光源の波面測定

1. フォトン数 2. コントラスト 3. 模様形状

これらのパラメータが測定誤差に与える影響を、月面模様を測定して調べる。
解析解の通りになるか？

→木星(や土星)の模様を波面測定で使ったときの
測定誤差の見積もりが可能に

2015/08/29 – 2015/09/06 の期間で、新たに作製した波面センサを使い
月面模様の測定を行った。

これから解析します

シャックハルトマン波面センサ

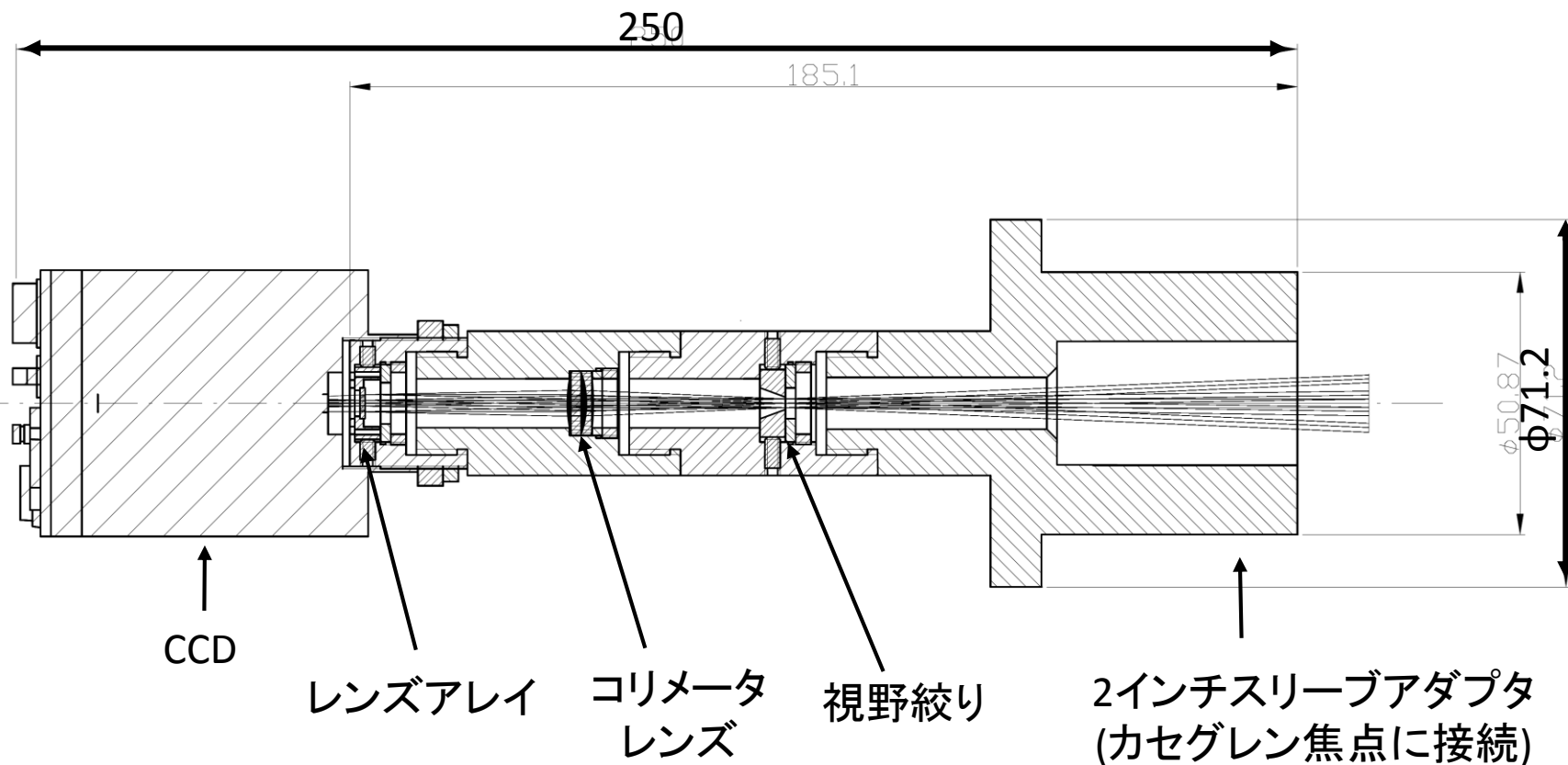
パラメータ

ピクセルスケール: 0.45[秒角/pix]

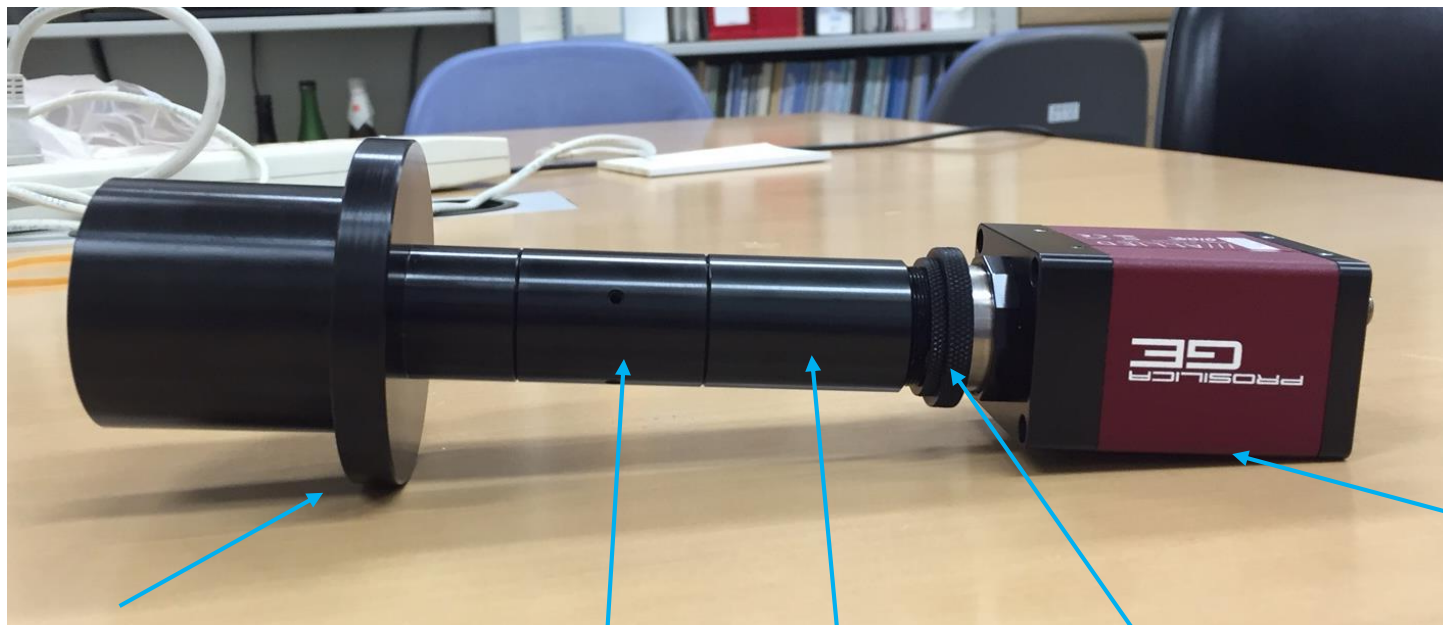
サブアパーチャ数: 11x11

サブアパーチャサイズ: 14.4[cm]

視野: 18.4[秒角]



シャックハルトマン波面センサ



CCD

2インチスリー
ブアダプタ
(カセグレン焦
点接続)

視野絞り
ホルダ

コリメータレン
ズホルダ

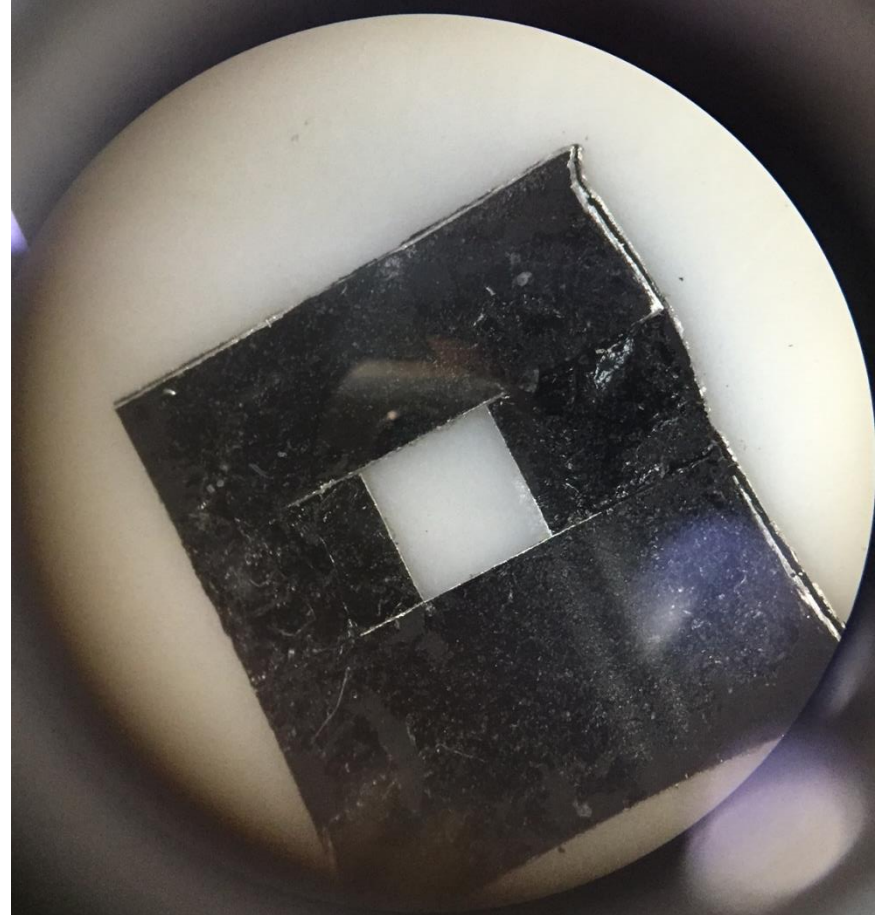
レンズアレイ
ホルダ

	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	205Hz

	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	APO-Q-P300-R3.2	ams	300μm	7.0mm

シャックハルトマン波面センサ

視野絞り



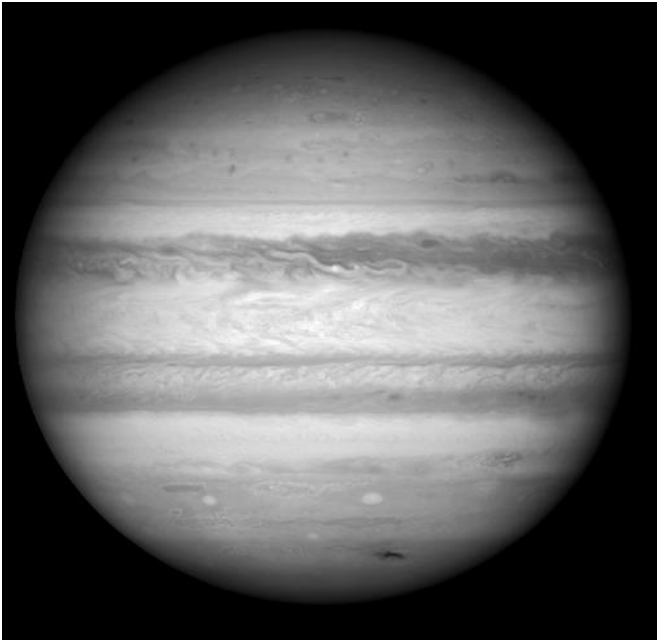
視野絞り:1.71mm×1.71mm平方
黒アルミホイルで作製

木星の疑似画像

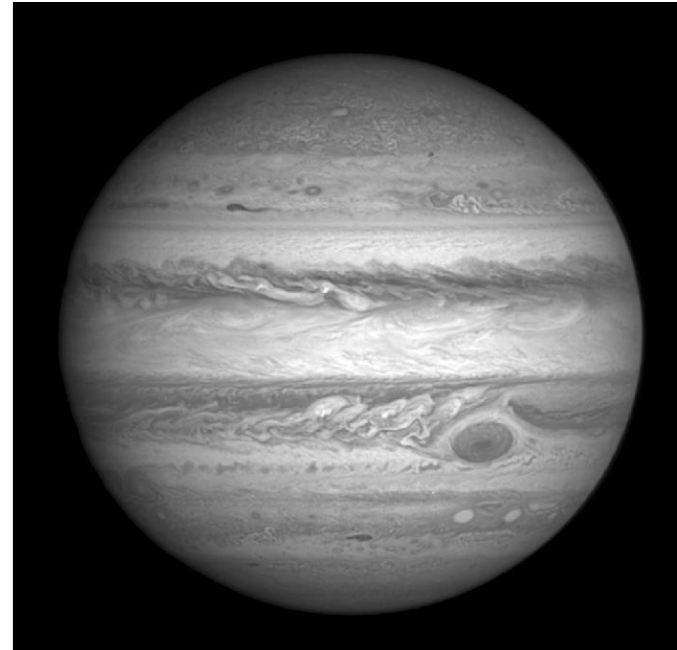
Hubble宇宙望遠鏡による木星画像を基に、波面センサによって撮像した場合の簡易な疑似画像を作成 (Moffatを畳み込み)

条件

- ・シーイングは**1.92"** (名寄サイトでのシーイング測定(13/09-14/08)の平均)
- ・木星の**高度は50°** ・木星の視直径は**47"** (最大)



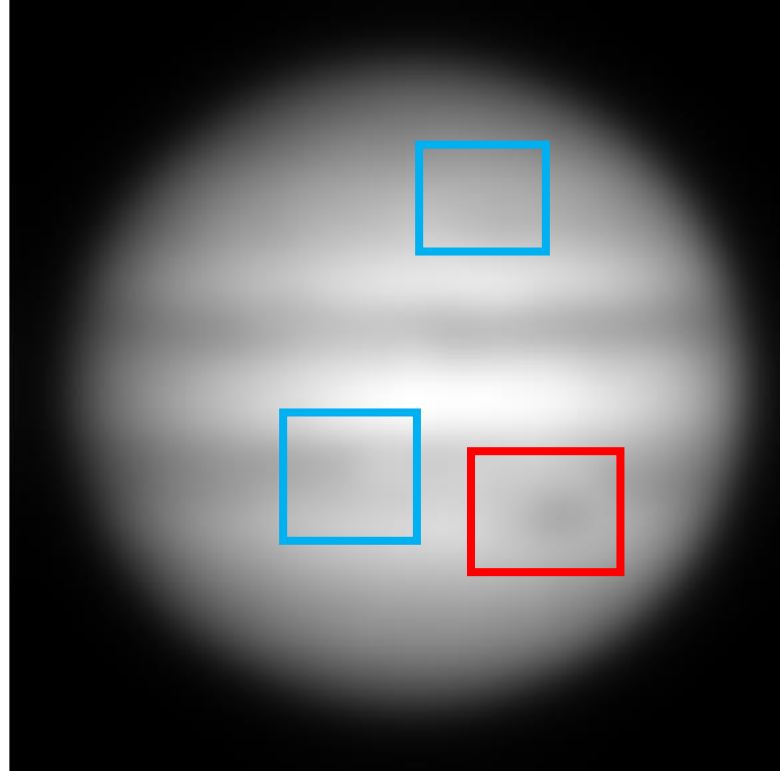
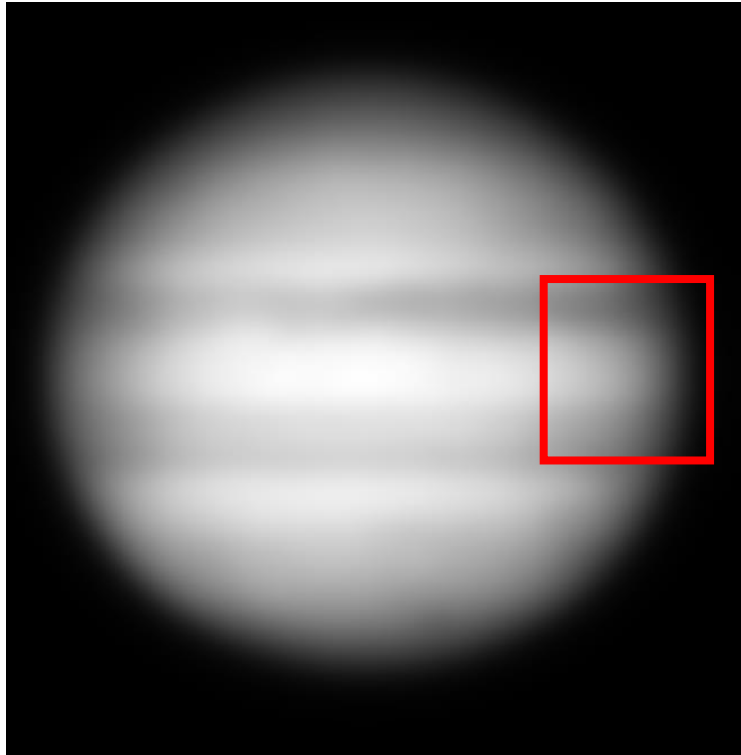
①508nmフィルタ画像(2010/3/15)
視直径:43"



②508nmフィルタ画像(2014/3/15)
視直径:34"

木星の疑似画像

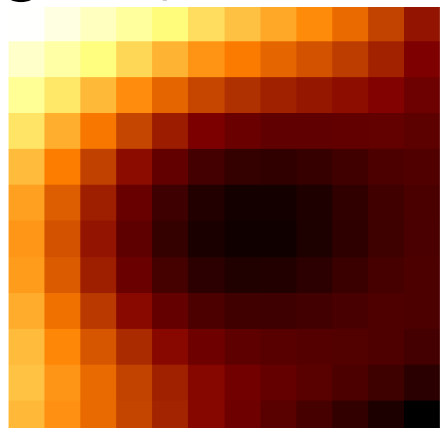
①画像(左)と②画像(右)による疑似画像から、相関が取れそうな模様をマーク



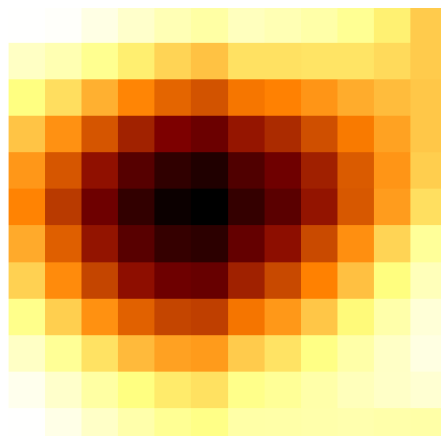
- ・縞模様内に存在する0.5—2"程度の白斑、黒点が見えない(ぼかし過ぎ,要検証)
- ・大赤斑ははっきり見えている。
- ・リムを使った波面測定は可能?

大赤斑

②の画像から切り出し

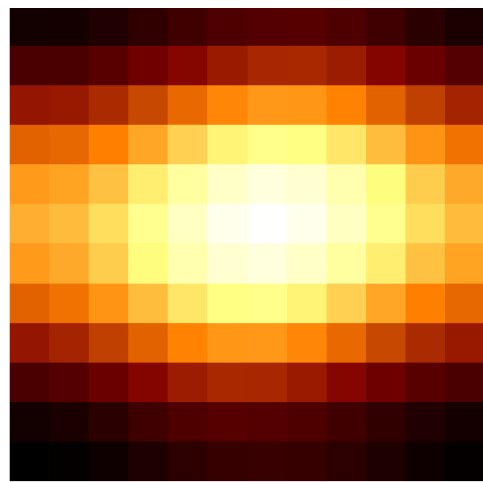


グラディエント
除去



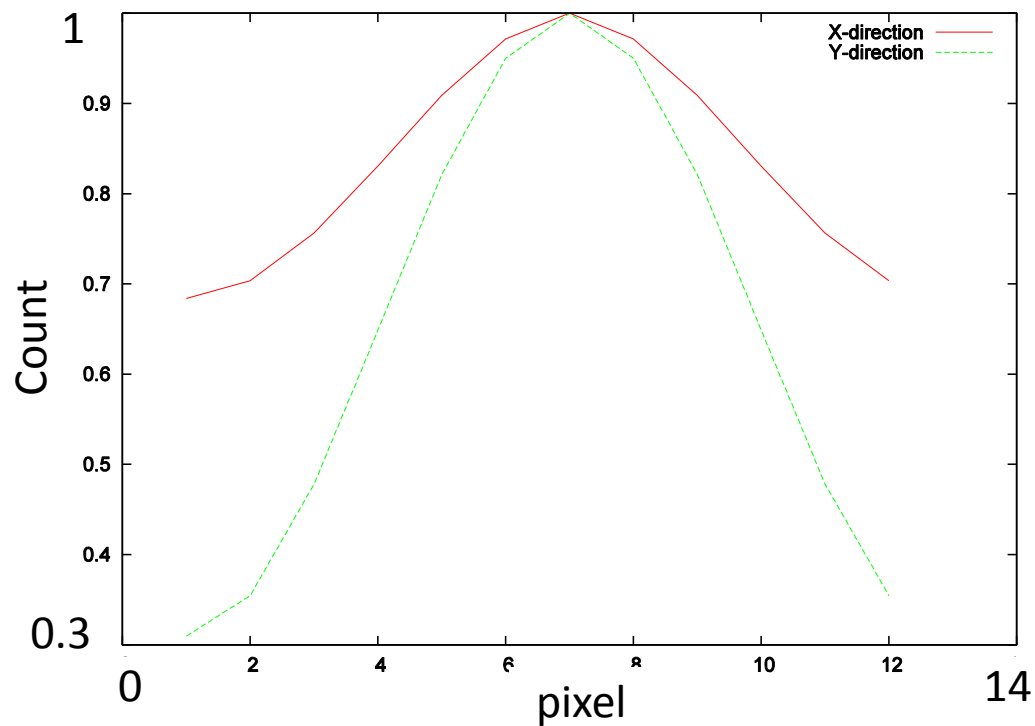
大きさ(縦:3.6" 横:5.4")
コントラスト: 3.7%

自己相関 (模様を表す)



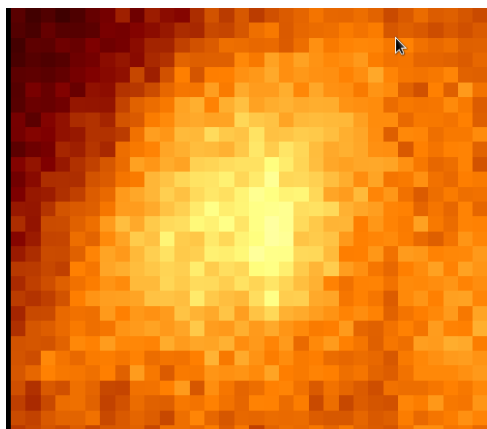
↑
Y方向

→
X方向



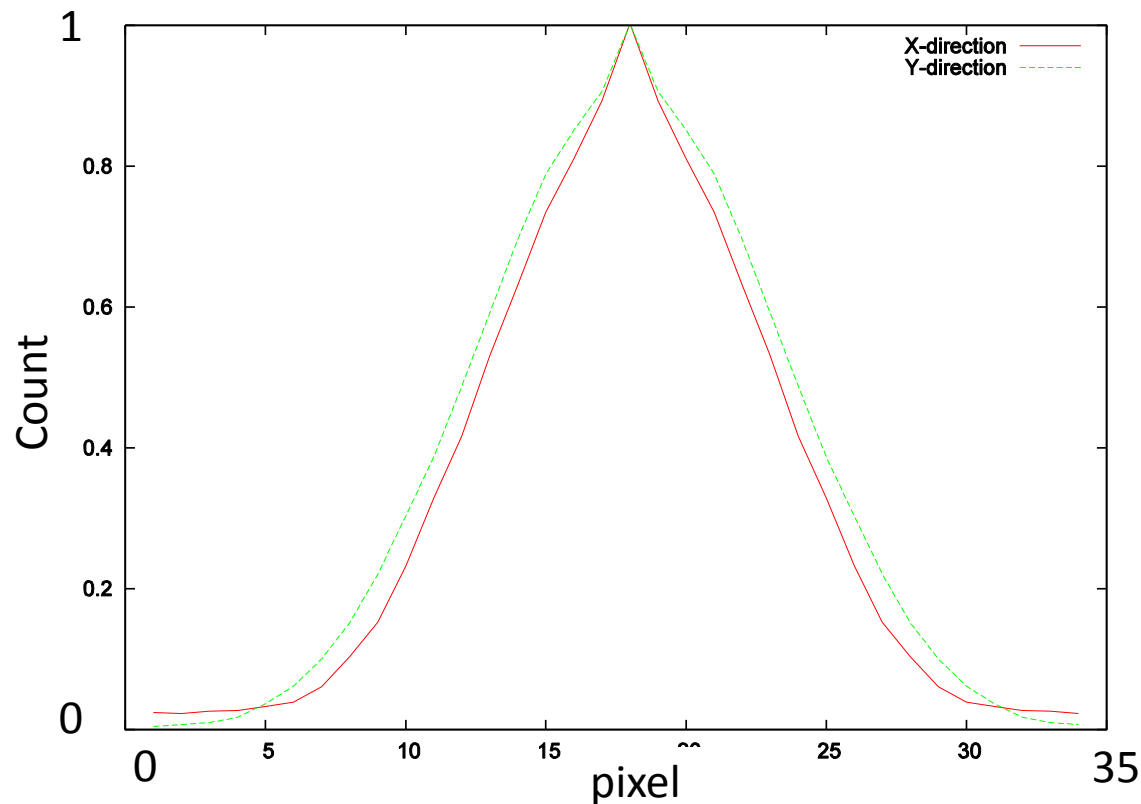
月面模様による波面センサ実験

大赤斑と似たような月面模様を波面センサで測定、簡易解析を行った
(2015年09月01日、シーイング1.8", 月の高度45度, 3msで撮像)

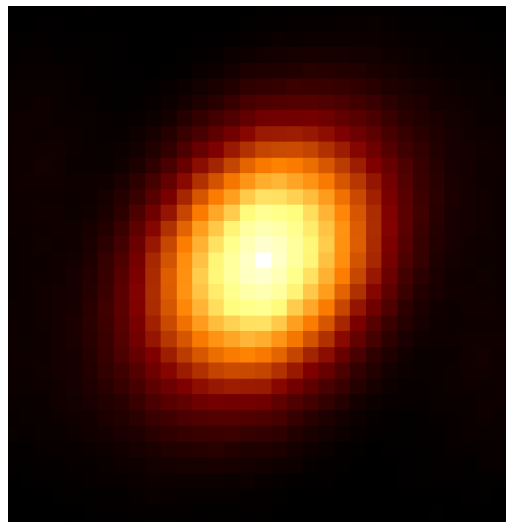


←リファレンスイメージ
大きさ(縦:5.8" 横:5.5")
(模様)の光子数... 1006

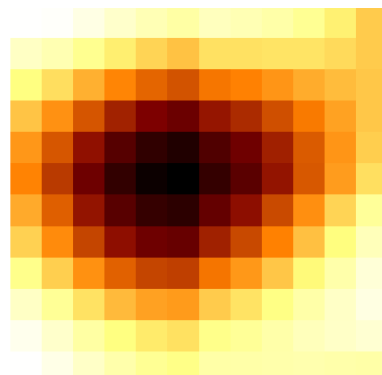
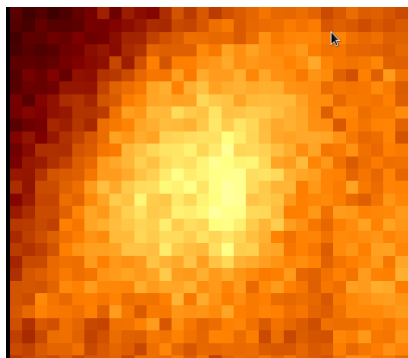
コントラスト: 3.6%



自己相関



大赤斑と月面模様と比較



大きさ(縦:5.8" 横:5.5")

コントラスト: 3.6%

フォトン数:1006

↔ 大きさ(縦:3.6" 横:5.4")

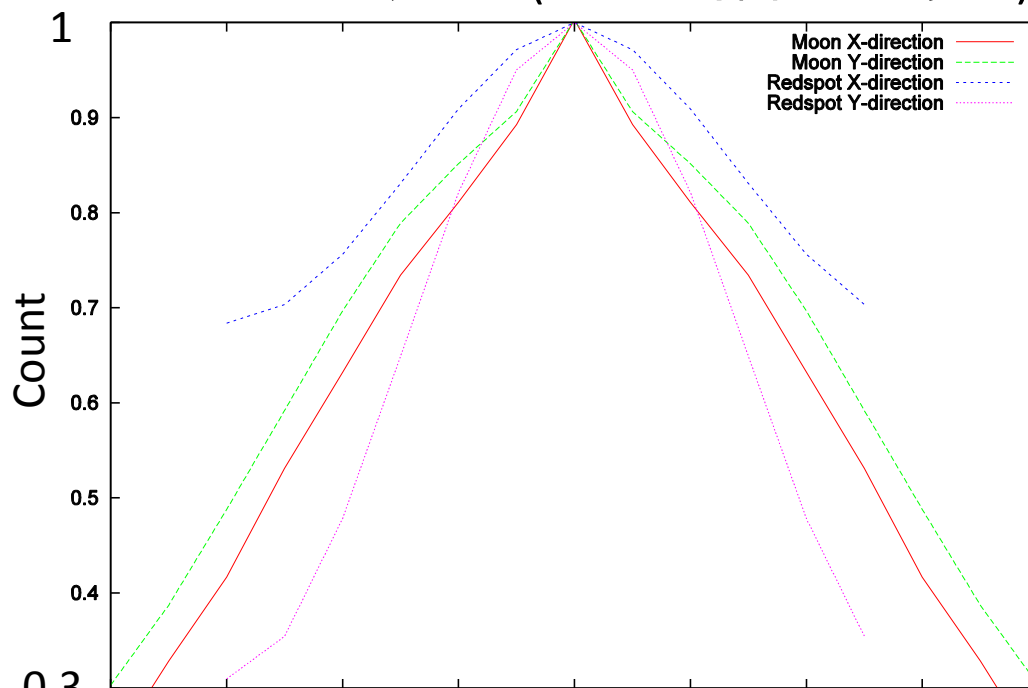
↔ コントラスト: 3.7%

↔ フォトン数:870 (10msで撮像した場合)

自己相関の比較

・ピーク付近の
立ち上がり方が違う

今回は模様の形状も
一緒とみなす



月面模様による波面センサ実験

月面模様の測定方法

- ・月近くの恒星(3.2等)でシーイングを測る (測定1)
- ・月面模様を測定 (測定2)
- ・月近くの恒星(3.2等)でシーイングを測る (測定3)

面光源を使った波面測定の精度が未知数なので、
月近くの恒星でシーイングを測定し比較

測定1,2,3共に総露出時間は30s, 露出時間3ms, FPS200
測定1の20分後に測定2、測定2の30分後に測定3

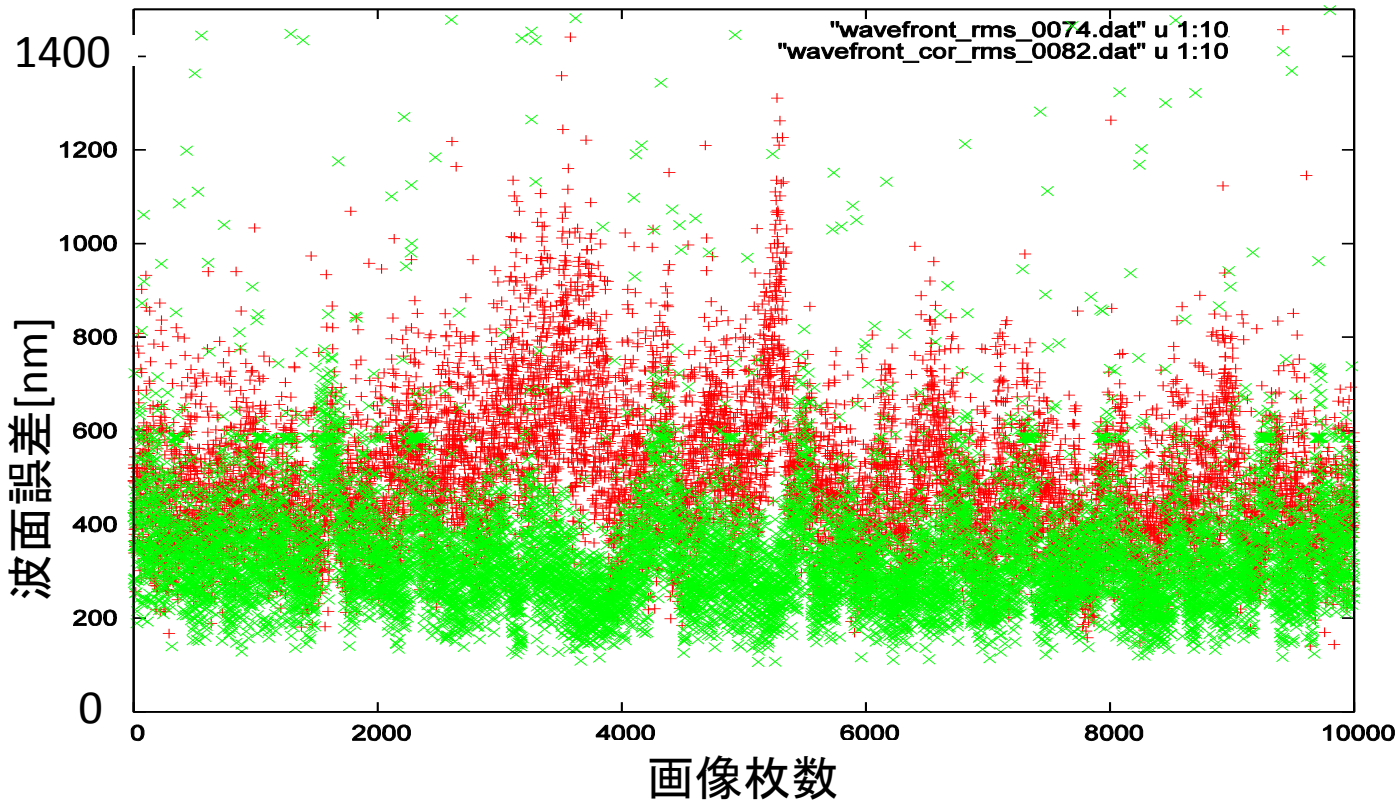
結果

- ・Tip-TiltとDefocusを抜いた波面誤差[nm]を示す。

測定1の平均: 510.4nm 測定2の平均: 425.4nm 測定3の平均: 448.9nm

平均を見ると、近い値
大赤斑を使う場合も、10msで撮像するのならば同じような結果が期待

月面模様による波面センサ実験



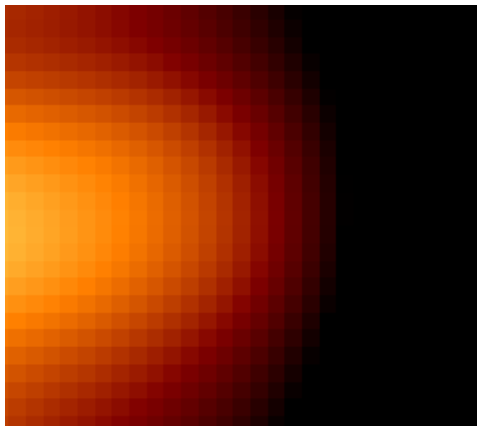
赤...恒星(測定1)
緑...月模様(測定2)

月面模様を使ったときの波面測定誤差を近似的に計算
(波面測定誤差(RMS)の時間平均) =
(測定した波面(RMS)の時間平均) - (シーイングから求めた波面誤差)
波面測定誤差は **-85nm** (測定2-測定1)

この方法で波面測定誤差を求めるには、サンプルをたくさん得るしかない

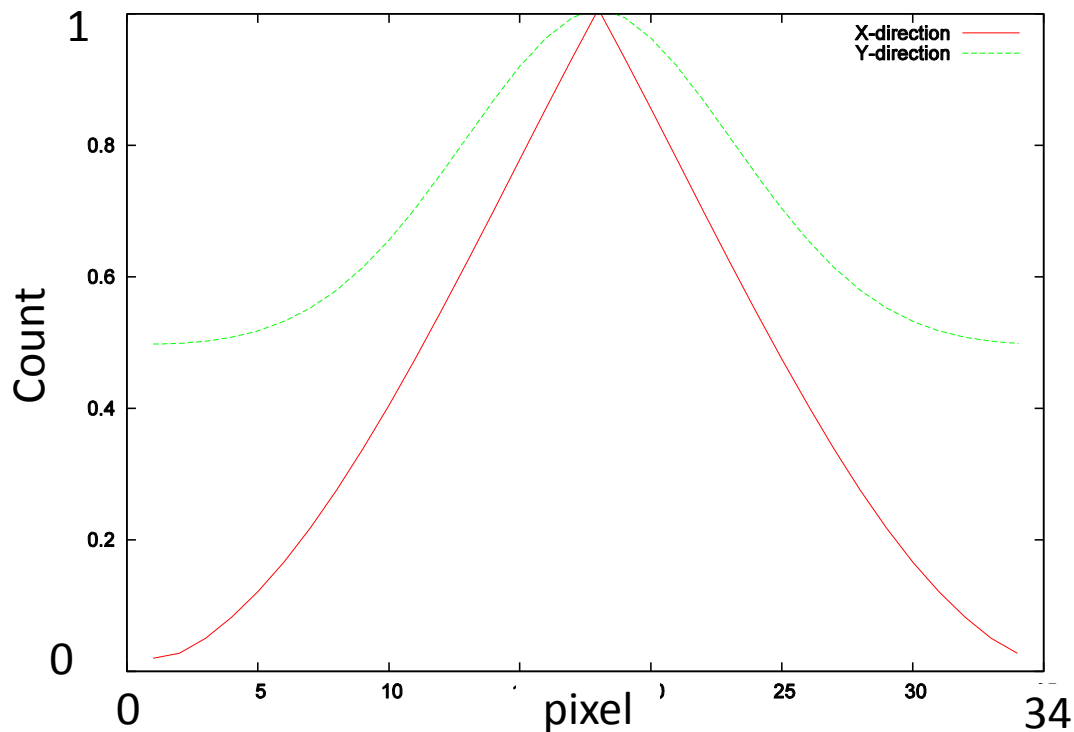
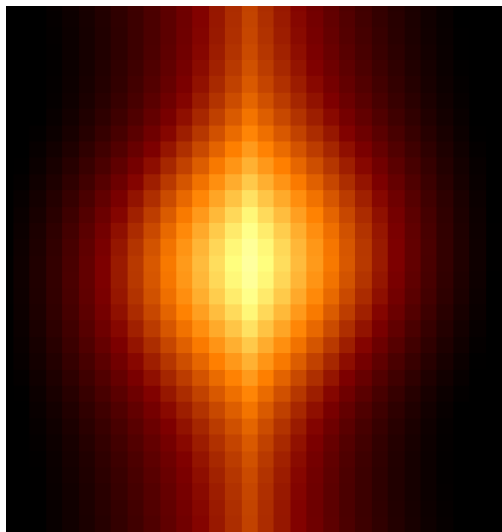
木星リム

②の画像から切り出し

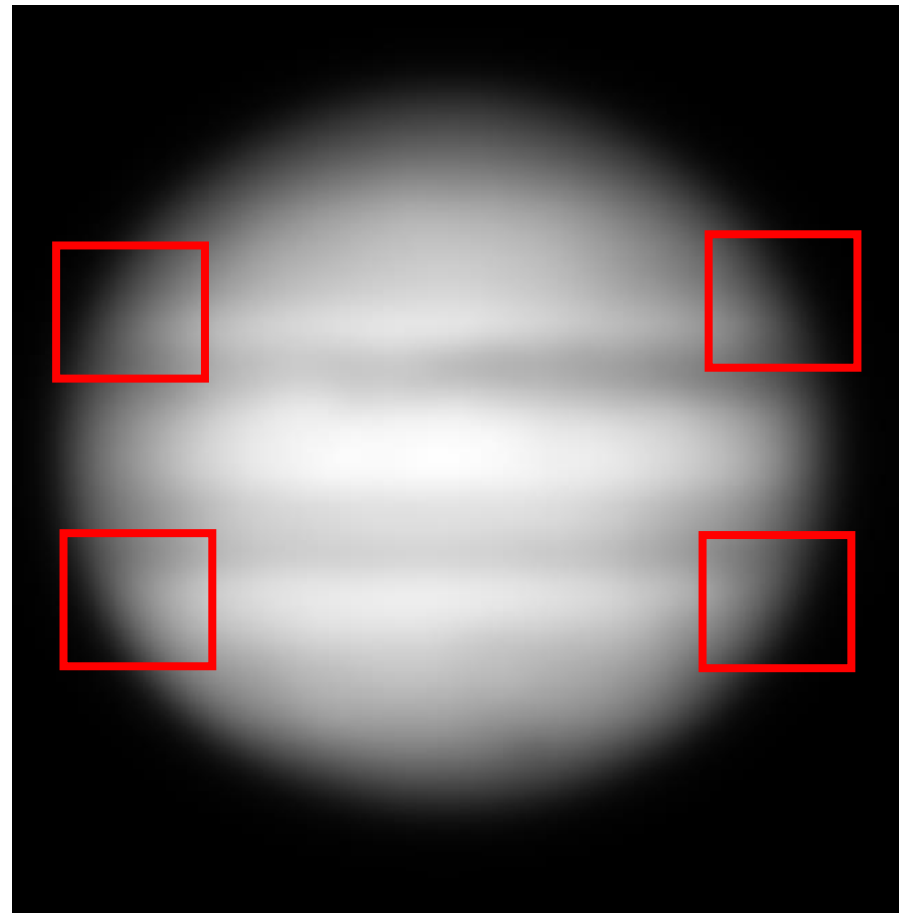
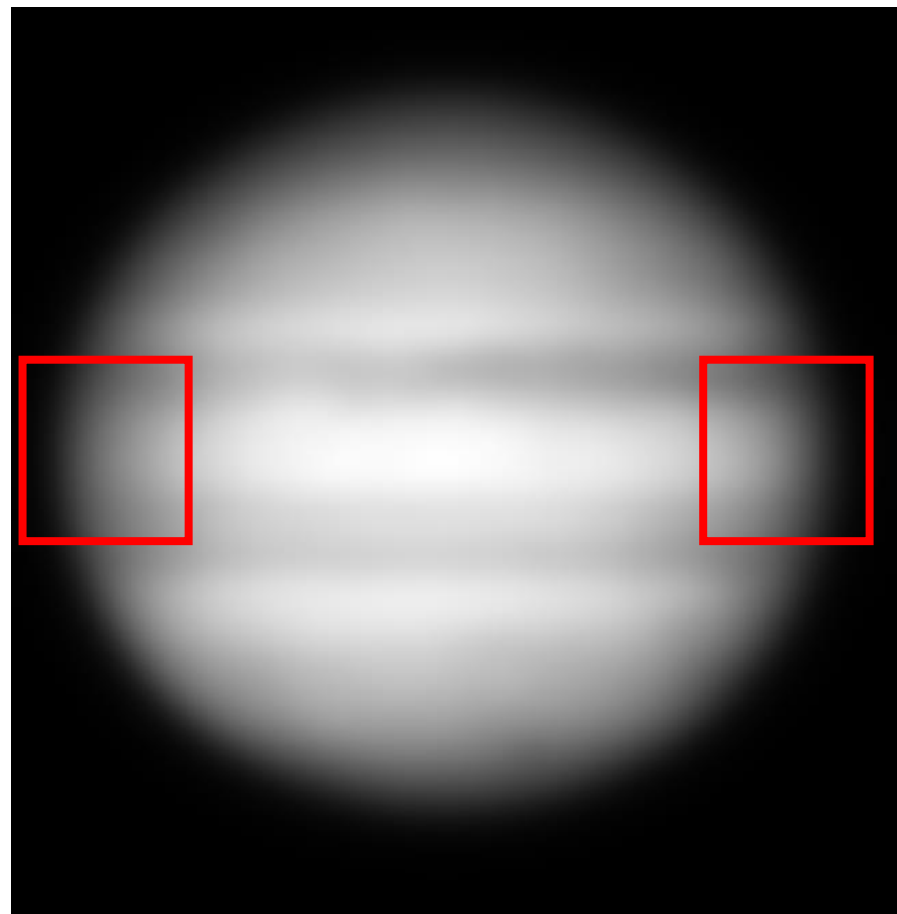


ベルトの幅は5"程度
リファレンスの視野を広くとるほど、フォトン数が大きく
(画像だと9000ほど(露出は10msと仮定する))
コントラストも大きくなる。(画像だと最大で12%)

自己相関 (模様を形状を表す)



木星リム



今後の予定

- ・月の模様の測定データの解析
フォトン数、コントラスト、模様の形状の関係性を
観測的に明らかにする。
- ・木星模様を測定(11, 12月)
どの模様を使うと、どのくらいの測定誤差になるか評価