

# 惑星表面模様の相関追跡 による波面測定方法の研究

北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

惑星宇宙グループ 修士課程2年

合田 周平

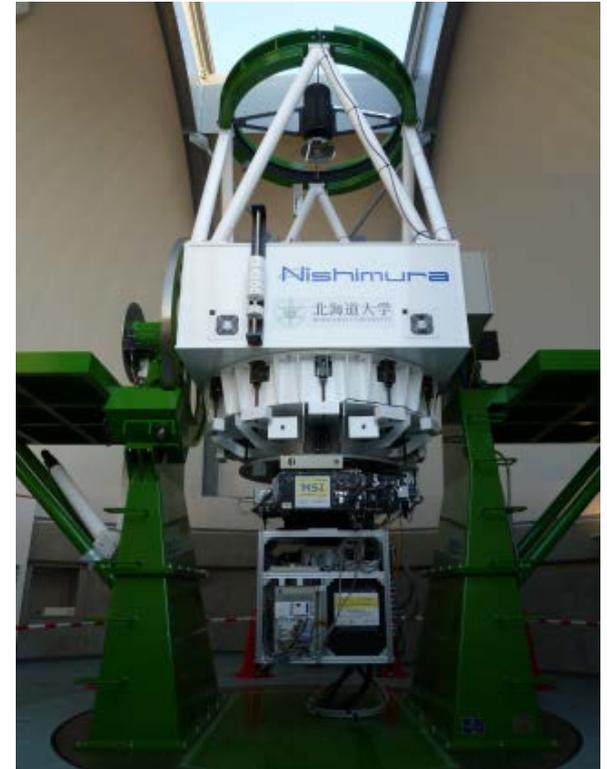
---

# 惑星観測用大気揺らぎ補償光学系の開発

北海道大学では、現在北大1.6m  
ピリカ望遠鏡に搭載するための惑星観測用の  
補償光学系装置の開発を行っている。

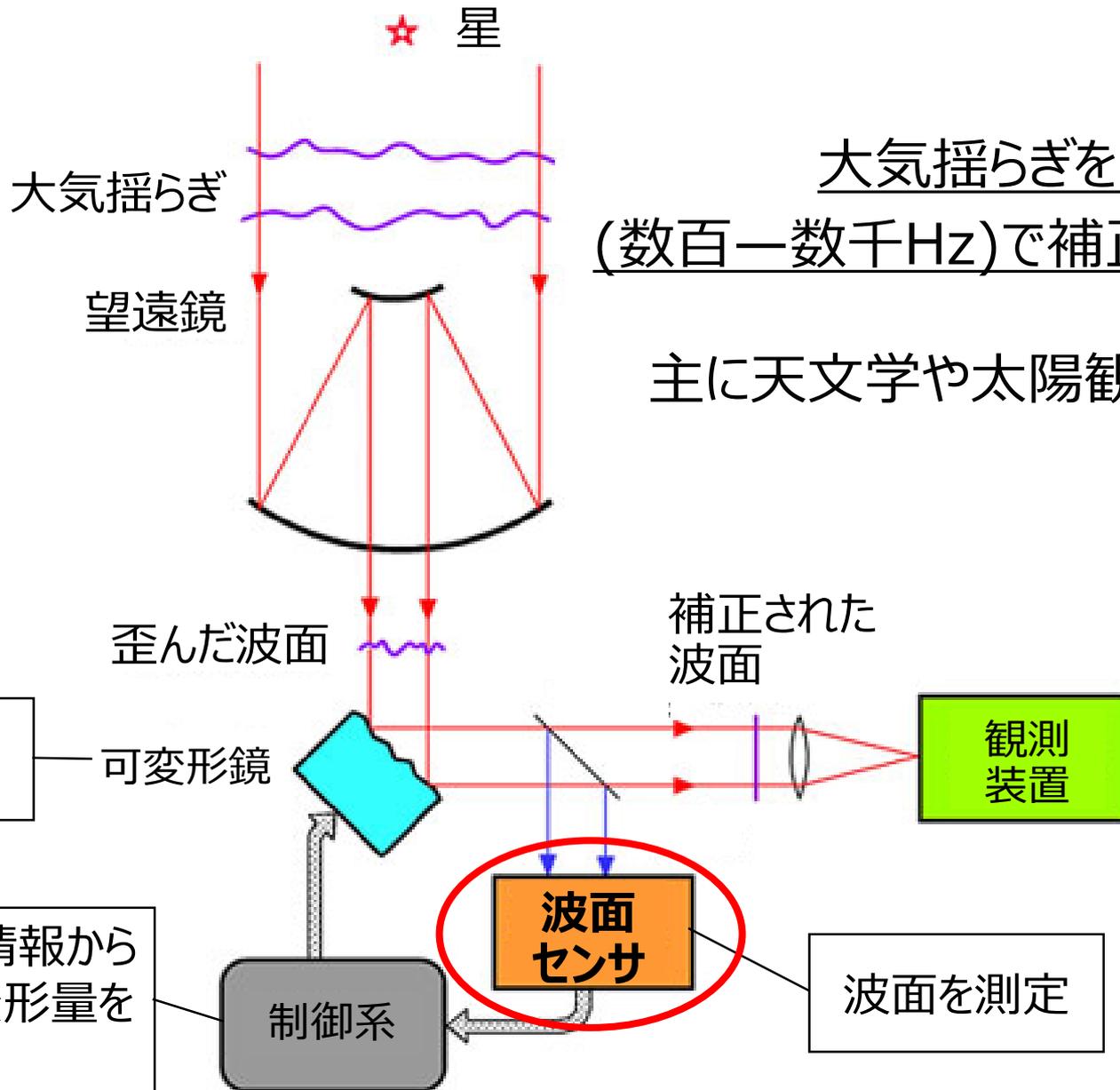
## 補償光学系の目標性能

可視光 $0.5\mu\text{m}$ よりも長波長側で、  
木星視直径程度の視野( $50$ 秒角)に渡り  
 $0.4$ 秒角程度の分解能で  
モニター観測可能なシステムの構築。



北大1.6mピリカ望遠鏡  
(北海道名寄市)

# 大気揺らぎ補償光学系



大気揺らぎをリアルタイム  
(数百—数千Hz)で補正する装置

主に天文学や太陽観測で使用

波面を補正

可変形鏡

歪んだ波面

補正された  
波面

観測  
装置

波面  
センサ

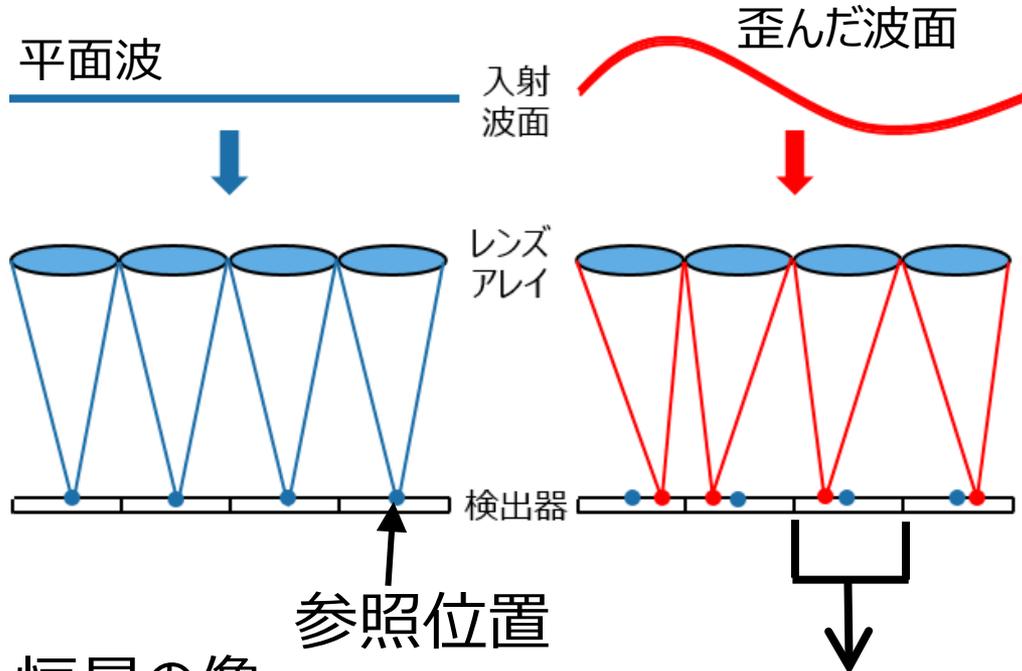
波面を測定

制御系

波面センサの情報から  
可変形鏡の変形量を  
計算

# 天文用補償光学系の一般的な波面測定方法

## シャックハルトマン波面センサ

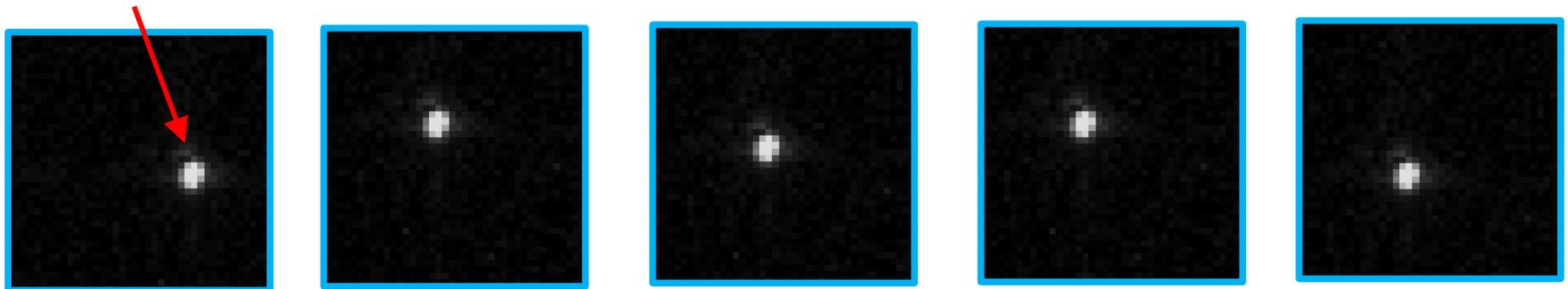


望遠鏡の開口をレンズレットアレイでサブアパーチャーに分割。

サブアパーチャー毎に、スポットの結像位置の参照位置からのズレから波面の傾きを測定。

スポットの結像位置は重心計算で求める。

恒星の像



時間経過

# 天文用補償光学系で惑星を補正する時の問題

天文用補償光学系では、補正対象のごく近傍に**明るい点状の波面参照光源**(恒星、衛星)が必要。



イオ通過開始  
00:00



イオ通過中  
01:10



イオ通過終了  
02:20

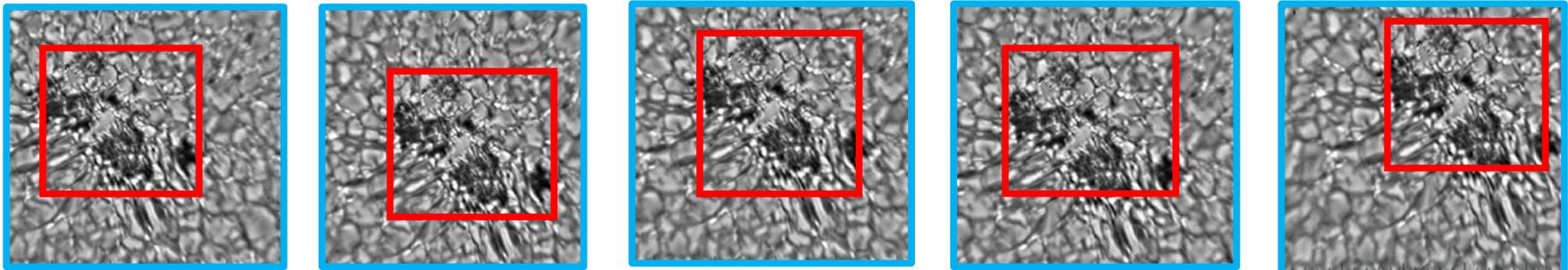
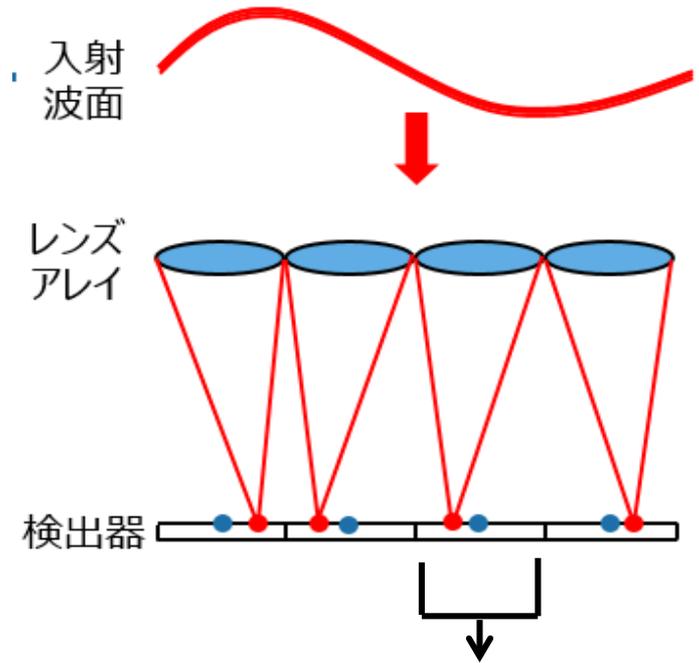
イオが木星近くにいるのは2時間程度

惑星と衛星の位置関係が都合のいい配置となる期間は限られているため衛星を波面参照光源にすることが惑星のモニター観測に不都合。

# 太陽用大気揺らぎ補償光学系

太陽用大気揺らぎ補償光学系では、**黒点**(10—30秒角のスケール)や**粒状斑**(1—2秒角のスケール)など広がった光源を参照光源として利用。

像の参照位置からのズレは、参照画像との相関計算によって求める。



時間経過

# 提案する波面測定方法とその問題点 / 目的

惑星用補償光学系では、惑星自身を波面参照光源とし表面模様の相関追跡によって波面を測定することを検討。

## 問題点

- 惑星の表面輝度は、太陽に比べると**暗い**(木星の場合、約15等級暗い)
- 惑星の表面模様のコントラスト(PV)は、太陽の黒点(50—70%)や粒状斑(30—40%)に比べると**低い**。(木星の場合、20--30%)
- 太陽の粒状斑は太陽表面全面に渡り不偏に存在しているが、惑星の表面模様は**場所によるサイズやコントラストなどの違いが大きい**。

## 研究目的

0.4秒角の分解能を達成するために、どのような波面測定法が最適か明らかにする。

- 模様に対して相関追跡を使った**波面測定誤差の定式化**
- 木星模様のコントラストなどの**パラメータのモデル化と波面測定誤差の見積**
- 月面観測**による、誤差の定式化の妥当性の評価
- 木星観測**による、誤差の定式化とパラメータのモデル化の妥当性の評価

# 波面測定誤差の定式化

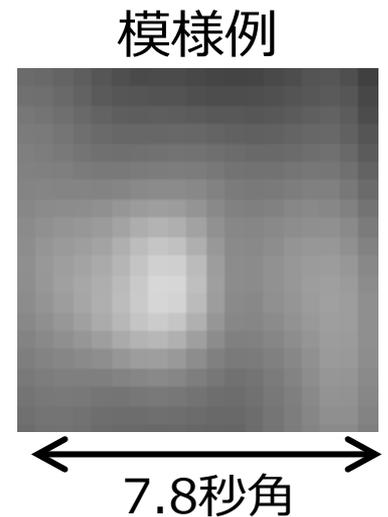
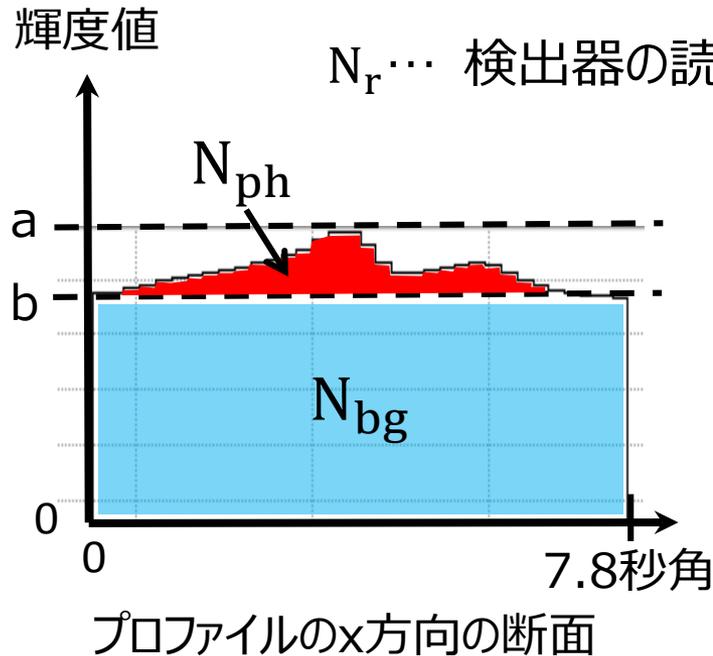
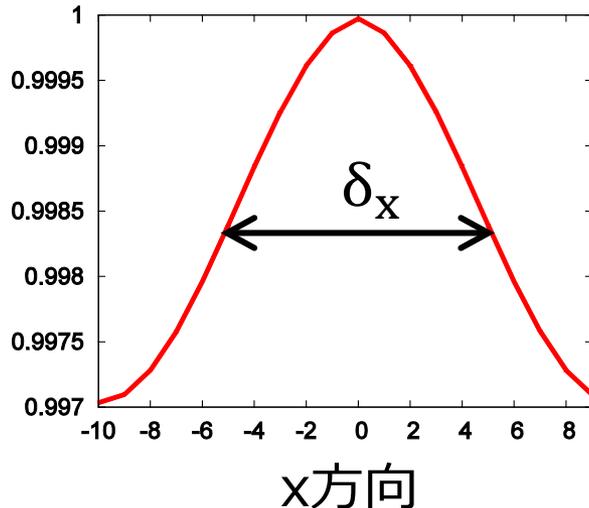
模様を利用した時の波面測定誤差

$$\epsilon_x^2 = \frac{4\delta_x^4(N_r^2 + b)}{N_{ph}^2} \text{ [rad}^2\text{]}$$

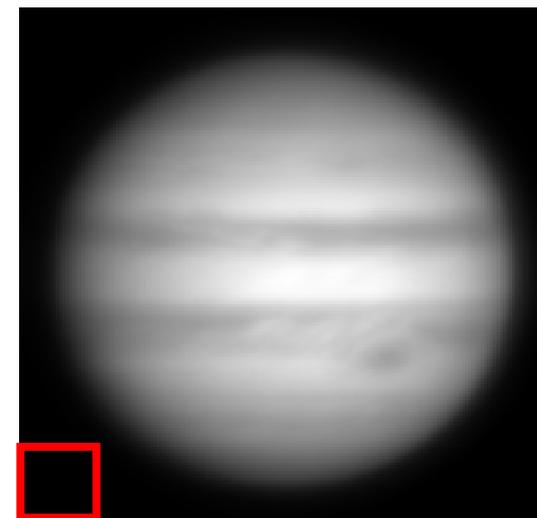
$$\doteq \frac{2\delta_x^4(N_r^2 + b)}{N_{bg}^2 C^2} \text{ [rad}^2\text{]}$$

- $N_{ph}$ … プロファイルに渡る光子数の総和
- $N_{bg}$ … バックグラウンド光子数の総和
- $a$ … プロファイルのピーク値
- $b$ … バックグラウンド(単位面積あたり)
- $\delta_x$ … プロファイルの  
自己相関関数のFWHM(x方向)
- $C$ … 模様のコントラスト ( $= \frac{a-b}{b}$ )
- $N_r$ … 検出器の読み出しノイズ

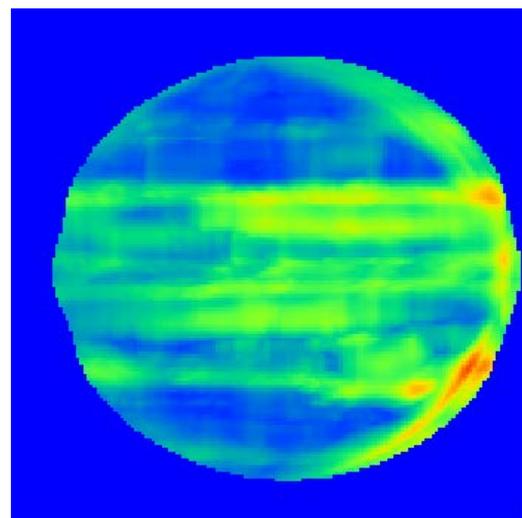
プロファイルの自己相関関数



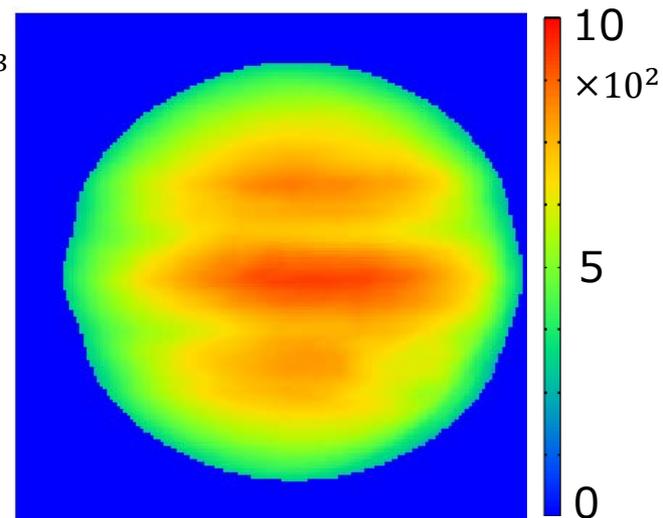
# 木星模様のパラメータのモデル化



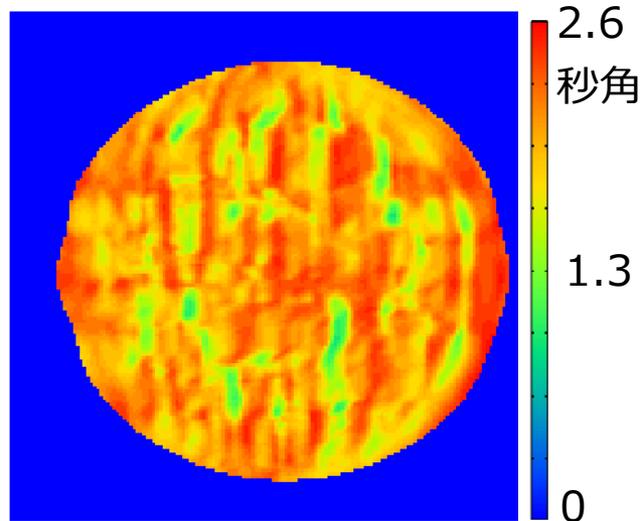
6秒角 木星画像A



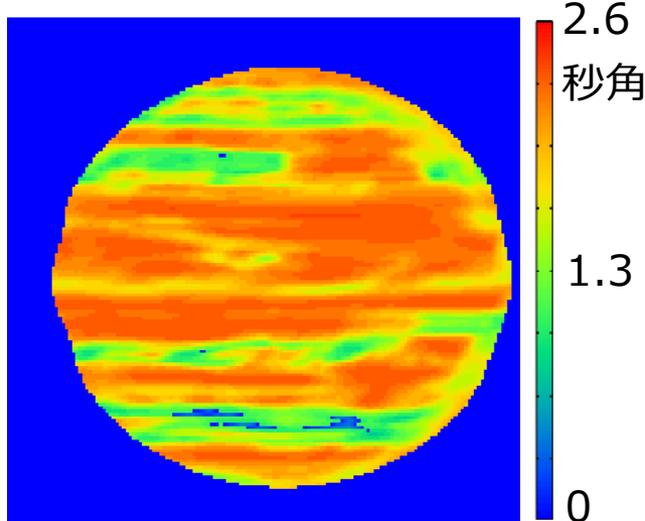
光子数



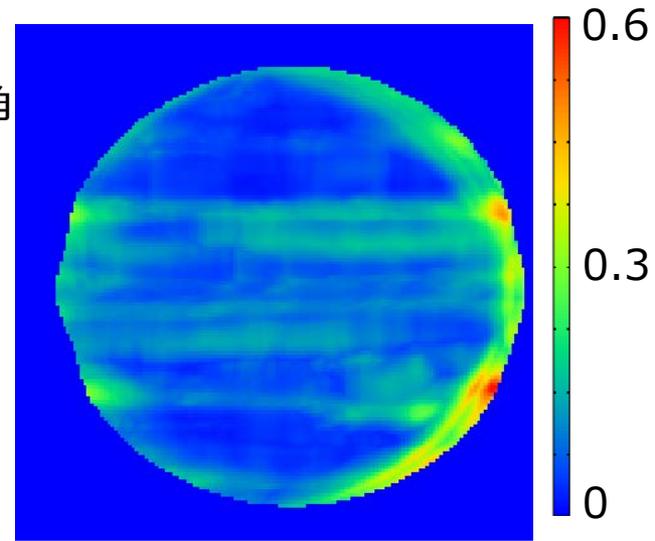
バックグラウンド



$\delta x$

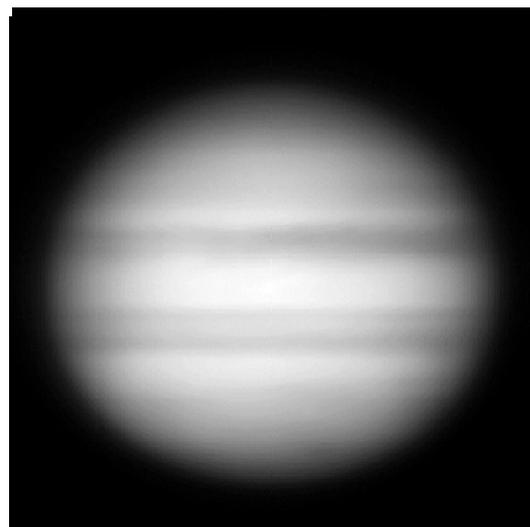


$\delta y$

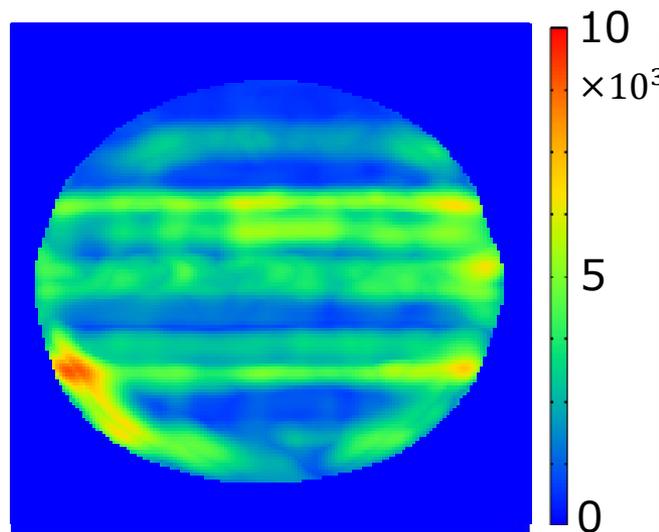


コントラスト

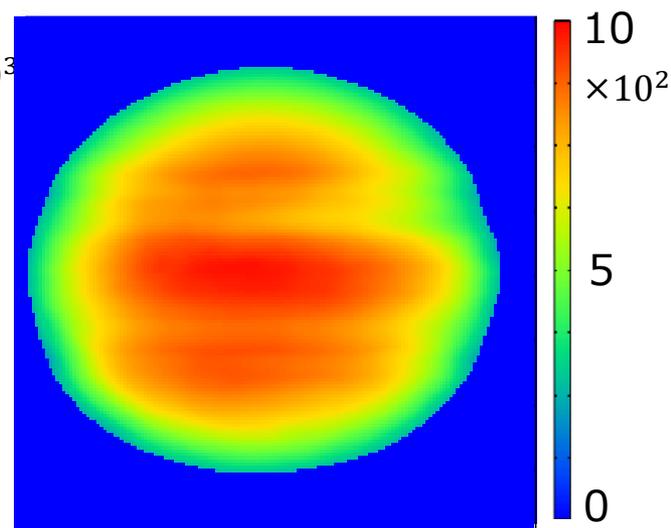
# 木星模様のパラメータのモデル化



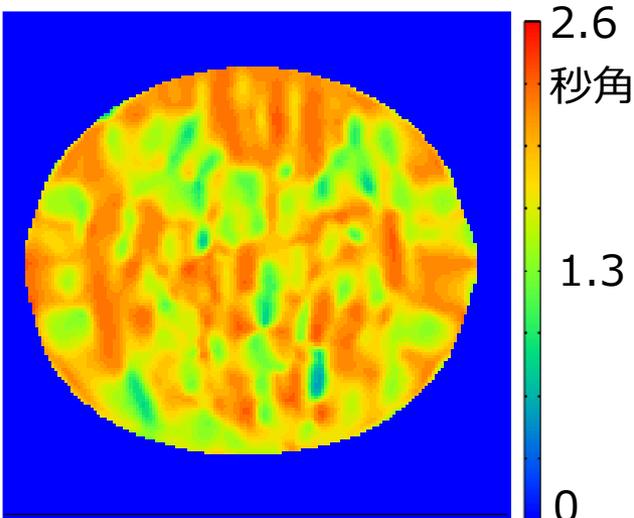
木星画像B



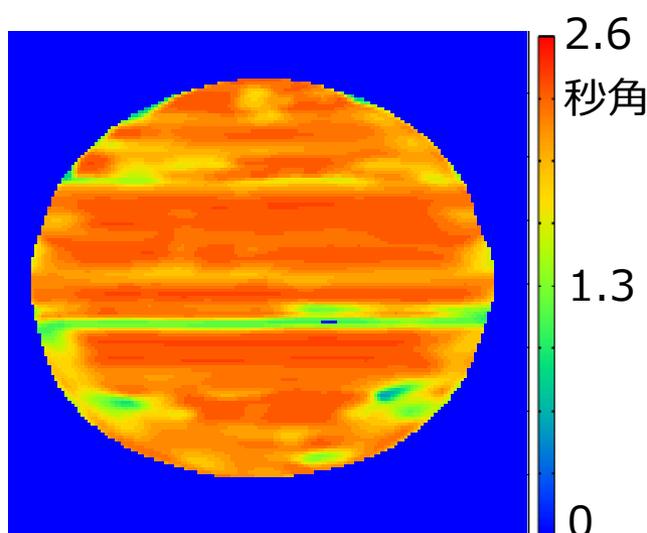
光子数



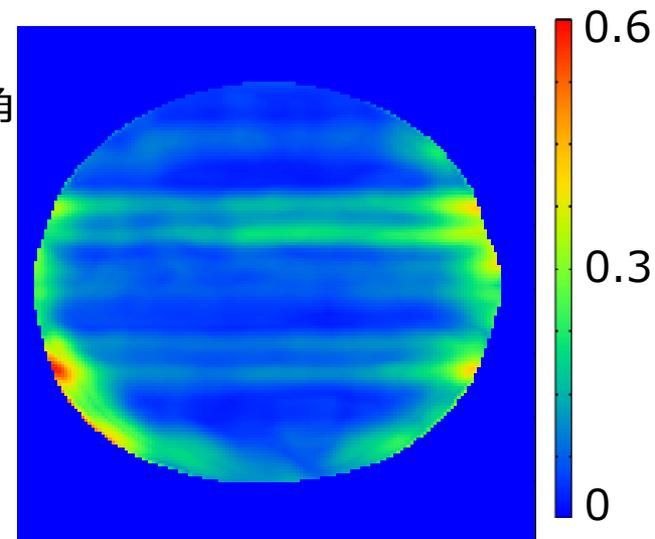
バックグラウンド



$\delta x$



$\delta y$

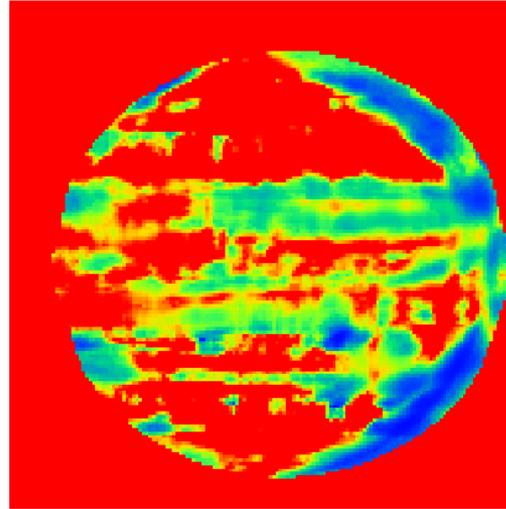
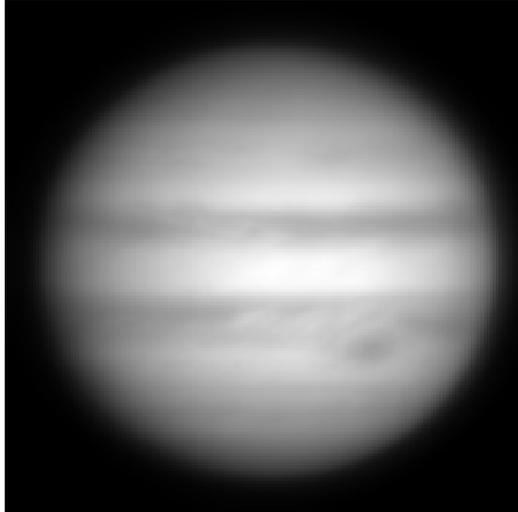


コントラスト

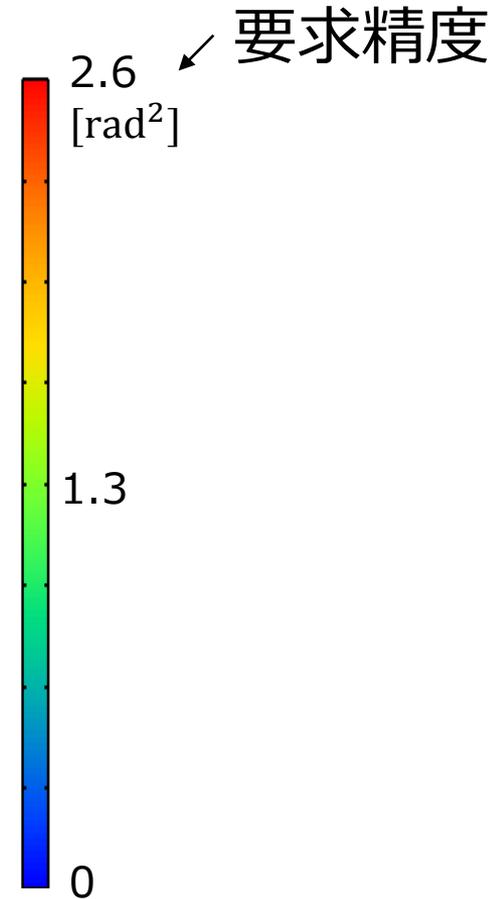
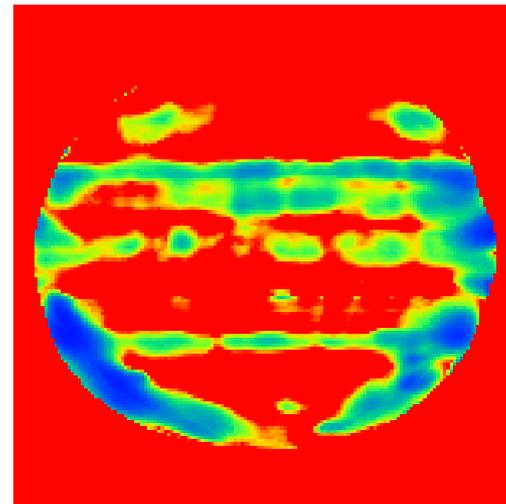
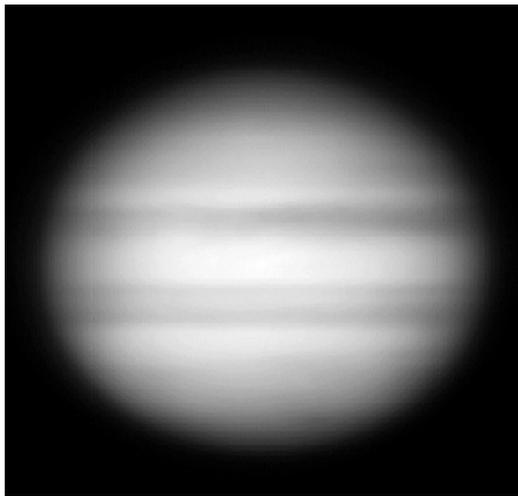
# 木星模様様の波面測定誤差の見積

波面測定誤差

木星  
画像A



木星  
画像B



大赤斑やベルト(暗い帯)を使用した時の波面測定誤差が小さい。  
木星全面**48%**の領域で0.4秒角の分解能の達成ができる見積

# 月面模様を使った波面測定

- ・シャックハルトマン波面センサを製作
- ・波面センサをピリカ望遠鏡に搭載して  
2015年8月—9月に月面の22箇所を観測



## 波面測定誤差の測定方法

- ・波面測定誤差は、波面センサで測定した大気揺らぎの大きさから求めた。
- ・波面測定誤差があると大気揺らぎの大きさの測定値には誤差の分大きく見積もられる。
- ・そのため、波面測定誤差が十分小さいとみなせる明るい恒星の観測から求めた大気揺らぎの大きさを差し引くことで誤差を求めた。

$$\begin{aligned} & \text{(波面測定誤差)}^2 \\ & = (\text{模様を使って求めた大気揺らぎの大きさ})^2 \\ & - (\text{恒星を使って求めた大気揺らぎの大きさ})^2 \end{aligned}$$

# 月面模様を使った波面測定

## 波面センサについて

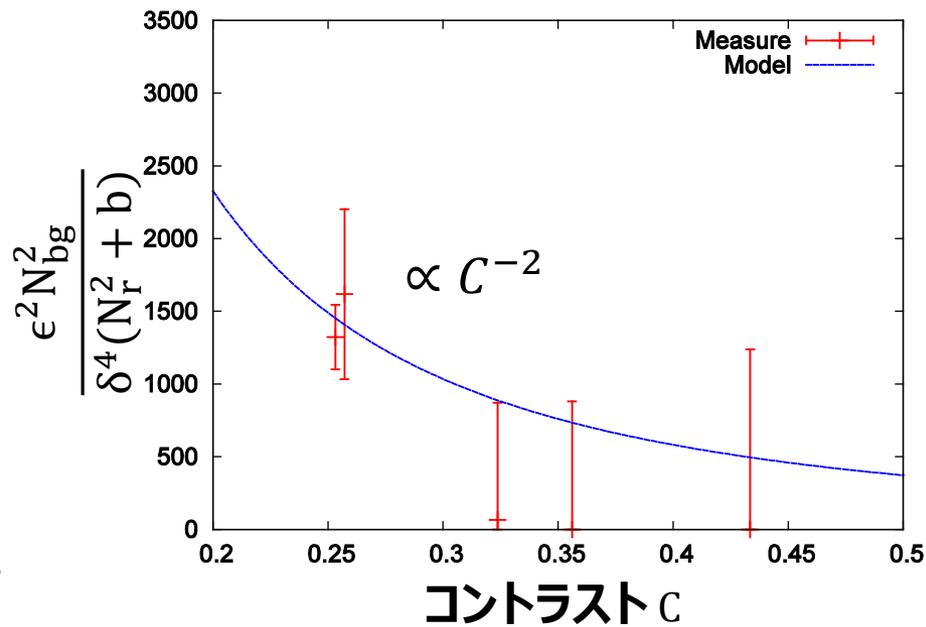
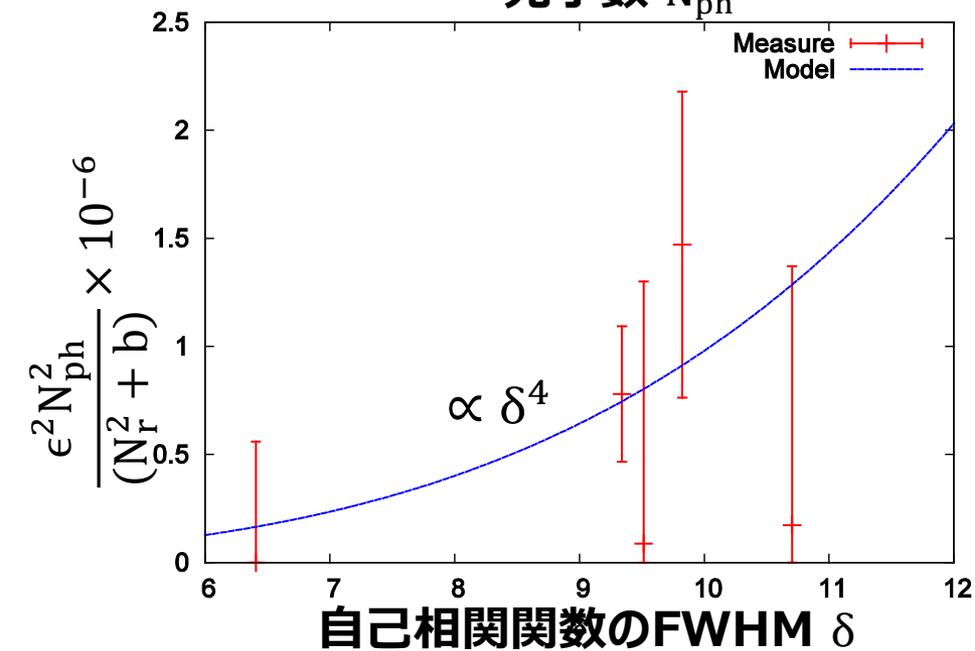
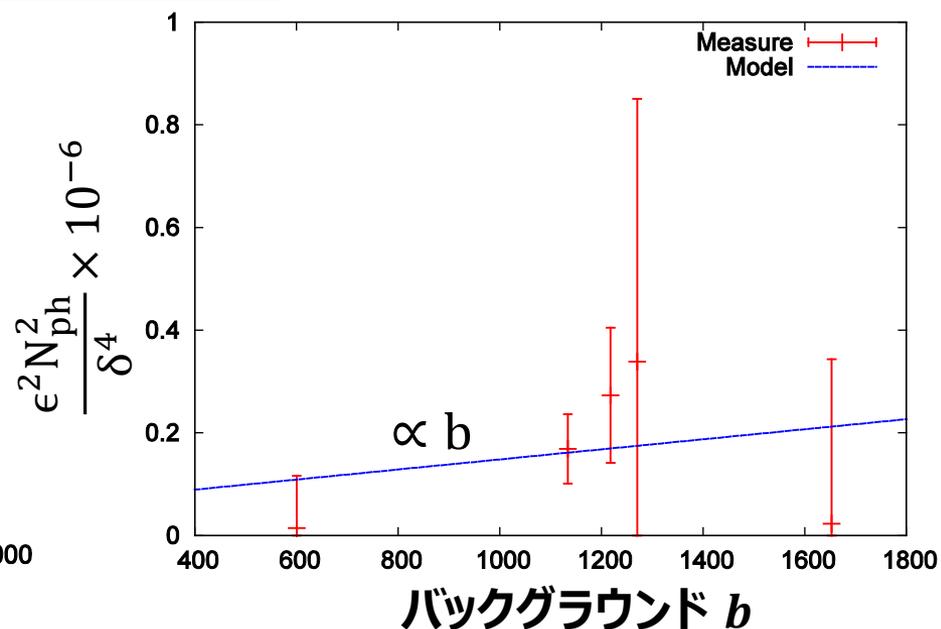
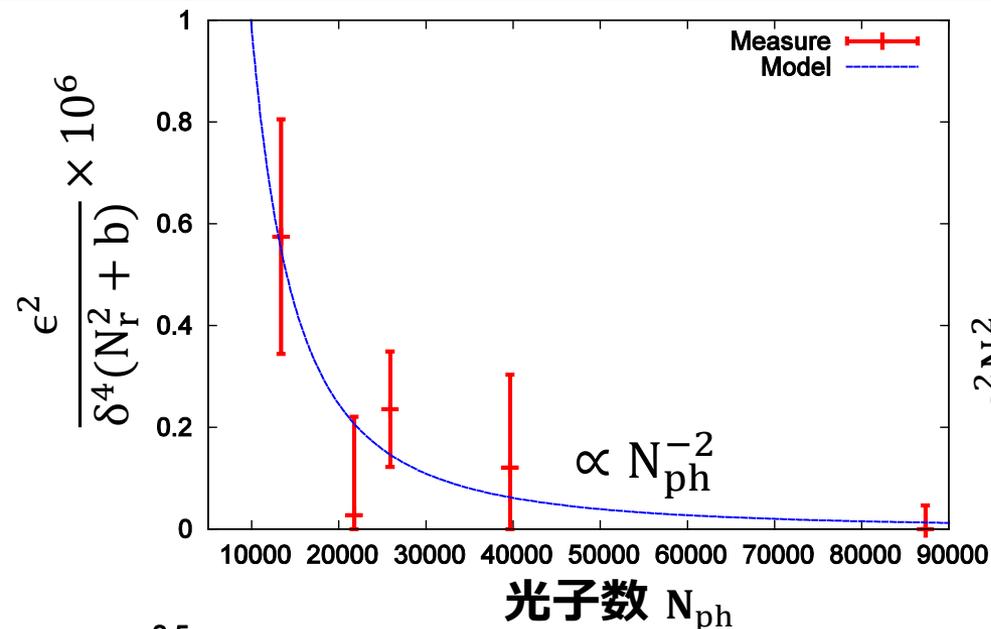
### 性能

- ・シャックハルトマン型
- ・瞳分割数: 11x11
- ・回折限界: 0.96["]
- ・ピクセルスケール: 0.39["/pix]
- ・サブアパーチャーサイズ: 14.4[cm]
- ・フィルター: なし
- ・動作速度: 200Hz



	製品名	メーカー	Pixサイズ	最大フレームレート	RON
∞	GE-680	Allied vision	7.4 $\mu$ m	205Hz	17e-
	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-R3.46	a $\mu$ s	300 $\mu$ m	7.6mm	

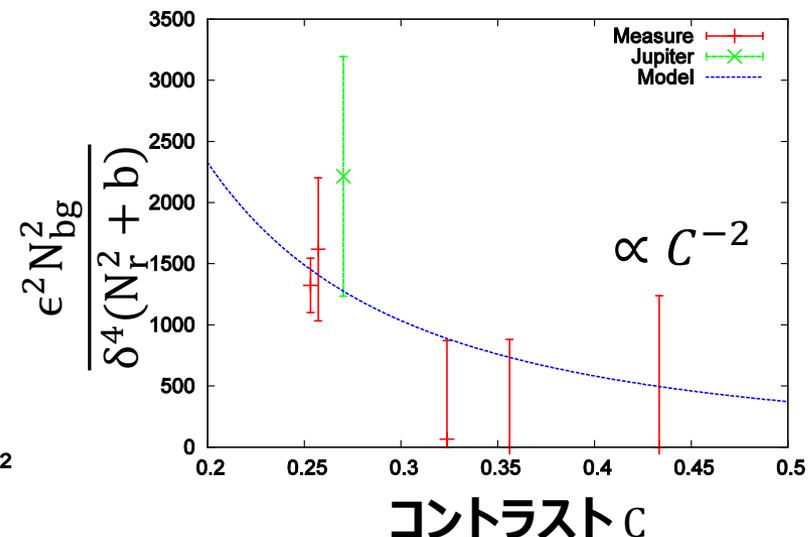
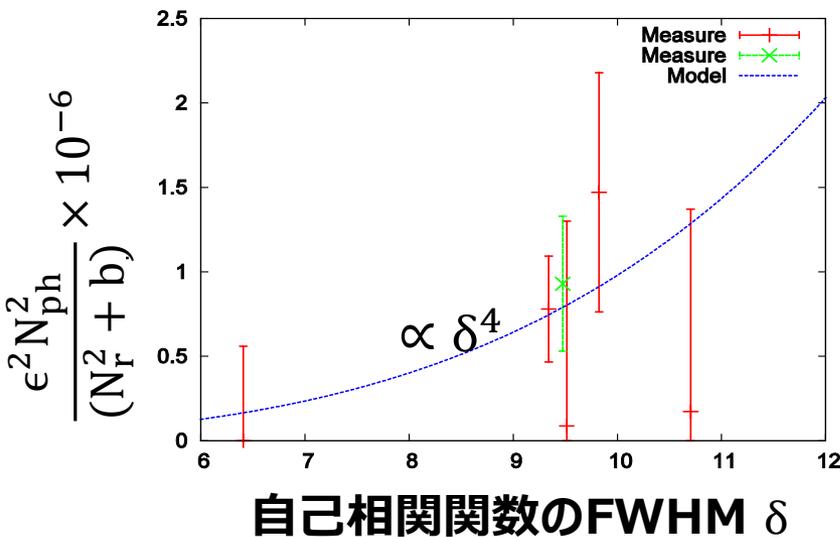
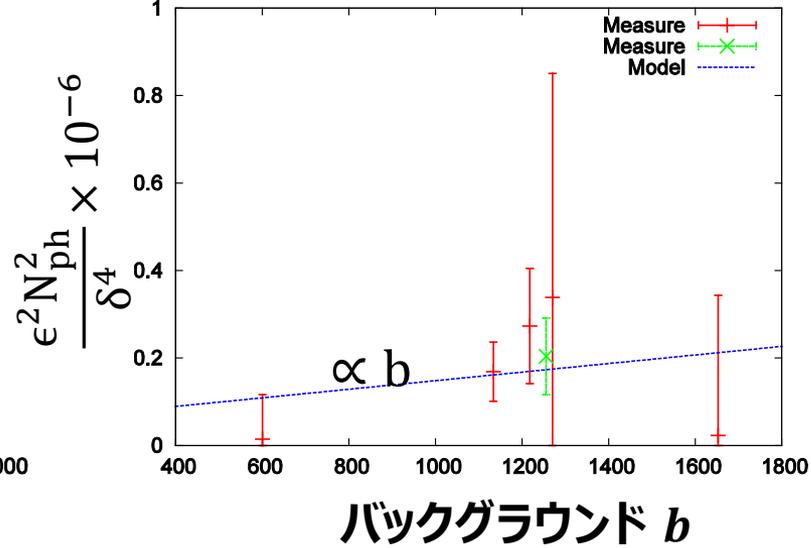
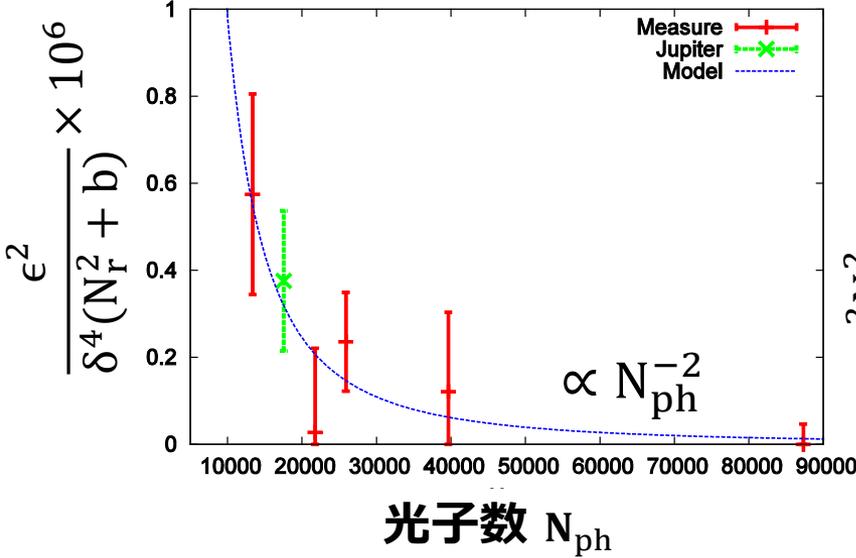
# 波面測定誤差の定式化の妥当性



# 木星模様を使った誤差の定式化の妥当性



木星模様を使った波面測定結果(1点のみ)



月面模様と同様に、誤差の範囲内でモデルと矛盾がないことを確認

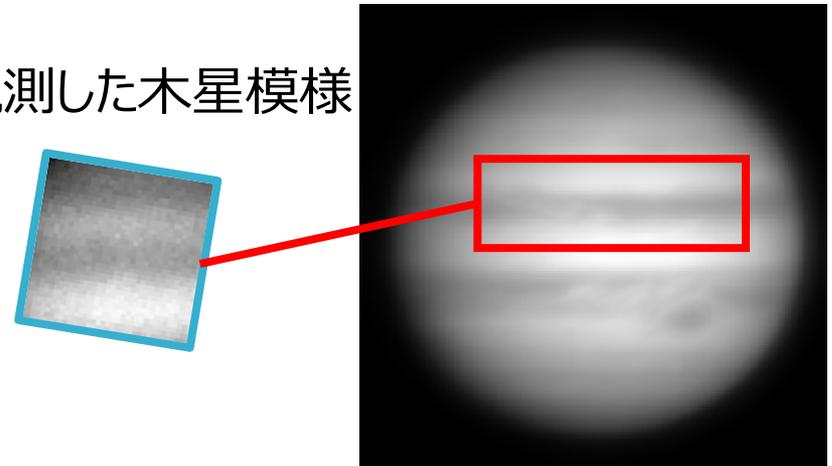
# 木星模様のパラメータのモデル化の妥当性

波面センサで撮像した実木星模様とモデル化された木星画像を比較し、木星模様のパラメータのモデル化の妥当性を評価

モデル化された木星画像

観測した木星模様

木星模様のパラメータに関しても、各パラメータについてモデル化した値と実測値が一致していることを確認



1-2割程度

の違い



実測値

モデル化された  
模様パラメータ

	光子数	バックグラウンド	FWHM(x)	FWHM(y)	コントラスト
実測値	5212	338	2.8 pix	4.3 pix	0.16
モデル化された 模様パラメータ	4593	304	3.6 pix	4.9 pix	0.13

# 結論

- 惑星表面模様の相関追跡による波面測定誤差の定式化と木星模様のパラメータのモデル化から、木星面の約48%の領域で0.4秒角の分解能の達成が可能になる見積もりが得られた。
- 月面観測を行い、光子数, バックグラウンド, 自己相関関数のFWHM, コントラストをパラメータとしてモデル化した波面測定誤差の見積値と測定値が、矛盾していないことを確認した。
- 木星観測からも同様に、モデル化した波面測定誤差の見積値と測定値が、矛盾していないことを確認した。また模様パラメータのモデル値と実測値が一致することを確認した。

以上より

木星の約48%の領域にある木星模様の相関追跡による波面測定を行うことで、0.4秒角の分解能の達成が可能である。

# 参考文献

---

- Rimmele, T. R., J. Marino., 2011, "Solar Adaptive Optics", LRSP, 8, 2.
- Thomas, S., T. Fusco., A. Tokovinin., M. Nicolle., V. Michau., G. Rousset., 2006, "Comparison of centroid computation in a Shack- Hartmann sensor", MNRAS, 371, 1, 323-336.
- Barrado-Izaguirre, N., J. Rojas., R. Hueso, A. Sanchez-Lavega, F. Colas, J. Dauvergne, D. Peach, The IOPW Team., 2013, "Jupiter's zonal winds and their variability studied with small-size telescopes", A&A, 554, A74
- Li, L., A. P. Ingersoll, A. R. Vasavada, A. A. Simon-Miller, A. D. Del Genio, S. P. Ewald, C. C. Porco, and R. A. West., 2006, "Vertical wind shear on Jupiter from Cassini images", *J. Geophys.* 111,