

## シャック・ハルトマン波面センサーの開発

森本 悠介 (京都大学大学院 理学研究科)

### Abstract

太陽系惑星だけでなく、太陽系外の惑星を観測し性質や分布を調べることは、惑星形成を論じるうえで重要である。現在までに、直接・間接撮像により、数多くの系外惑星が検出されてきたが、直接撮像による検出数は間接撮像による検出数に比べて、圧倒的に少ない。また検出された惑星の種類は木星の数倍の大きさを持つ木星型惑星や、自ら発光している惑星にとどまる。直接撮像での検出が難しい一方、分光観測技術と組み合わせることによって、惑星の構成物質が特定できるなど、惑星の性質を調べるうえで必要な観測方法でもある。今後、地球型惑星のような小さな惑星を直接撮像で捉えるためには、地球大気による観測光の波面揺らぎを補償する、補償光学と呼ばれる技術のさらなる向上が必要とされている。

現在、我々のグループが開発している“SEICA”という補償光学装置は、波面の揺らぎを高周波成分と低周波成分に分け、二段構えでそれぞれの成分を補償する構造になっている。これによって、望遠鏡の開口径により決まる分解能の限界値である回折限界に近いイメージングを可能にし、木星と同程度の大きさの系外惑星の直接撮像が可能となる。

この“SEICA”の装置の中で、シャック・ハルトマン波面センサーは大気による観測光の波面揺らぎを測定する装置であり、“SEICA”の性能を左右する装置の一つである。今回はシャック・ハルトマン波面センサーの設計、組み立て、実験室内で波面揺らぎの測定を行い、性能評価を行った。

## 1 Introduction

我々は太陽系外惑星探査に向けたナスミス式分割鏡望遠鏡 京大岡山 3.8M 望遠鏡を開発している。系外惑星を直接撮像するためには、主星と惑星の光を区別できるような高空間分解能、高コントラスト観測装置が必要である。しかし、大気乱流によって生じるものと、望遠鏡を含む観測装置自体により生じる波面揺らぎによってこれらの実現が妨げられている。現在すばる望遠鏡を含む多くの望遠鏡で、大気由来の波面揺らぎを、補償光学装置を使って補償した高コントラスト観測が行われている。一方、望遠鏡由来の波面揺らぎの補償は、能動光学によって行われている。しかし我々が採用している分割鏡では、従来の単一主鏡望遠鏡に比べて、より複雑な鏡の制御技術が必要である。分割鏡制御には鏡面を測定するための波面センサーが欠かせない。今回私は、同じく分割鏡を採用している Keck 望遠鏡を参考にし、波面センサーの設計を行った。

## 2 Methods

単一鏡では、鏡の自重によるたわみをアクチュエータを使って制御(能動制御)している。分割鏡では自重による鏡面の変化だけでなく分割鏡の1枚1枚の位置ずれ、姿勢変化を制御しなければならない。各鏡の位置・姿勢制御は分割鏡の裏に取り付けられた3点のアクチュエータにより行い、各鏡面の歪みの制御はワーピングハーネスによって行う。これらの鏡面制御による望遠鏡焦点面での変化を、今回私が開発した波面センサーによって観測する。

アクチュエータの可動域に合わせてセンサーに要求される視野が決まり、センサーの精度は補償光学装置で補償できる精度になるようにした。また、波面センサーの使用頻度、小型化などを考えて3つのモードに分けて装置を考えることにした。

### 2.1 広域モード

広域モードは、望遠鏡の立ち上げ時など、各鏡の向きがまったくバラバラの向きを向いているときか

表 1: 要求仕様

	広域	中域	多点
視野	20'	1'	-
精度	0'.5	0 ".1	0 ".1
精度	1	2	6

ら、0'.5 の精度で各鏡の傾きを揃える場合の使用を想定しており、使用頻度は低いが、欠かすことのできないモードのセンサーである。

広域モードでの測定時は、各鏡の上空 7m 上にそれぞれ一つずつの点光源を配置し、望遠鏡焦点の後ろにレンズを配置して結像させ、点光源像の位置を CCD アレイで検出する。光源面とセンサー面上での像点の位置関係を比べ、位置のずれで各鏡面の傾きを評価する。鏡面全体の傾きを 20' の広い視野で鏡面の傾きを 0'.5 の精度で測定できるように広域モードの波面センサーの設計を行った。まず、ナスミス台でのフランジバックから結像レンズと CCD との間の距離を 50mm と仮定する。レンズ、鏡の公式より

$$\frac{1}{S_o} + \frac{1}{S_i} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

これよりレンズの焦点距離が求まり、また分割鏡による波面エラーと像点の位置変化の関係は主鏡、副鏡、レンズの倍率を用いて、

$$r = m_{main}m_{sub}m_{lense}S_{omain}\theta. \quad (2)$$

ただし、 $S_o$  は物点から主面までの距離、 $S_i$  は主面から像点までの距離、 $f$  は焦点距離、 $r$  は像点の位置変化、 $m_{main}$ 、 $m_{sub}$ 、 $m_{lense}$  は主鏡、副鏡、レンズの倍率、 $S_{omain}$  は物点から主鏡までの距離、 $\theta$  は波面エラー。

この結果から、まずは開口をレンズとして、20' の傾きが検出可能かどうかを調べる。次に、要求仕様で検出するために必要な CCD のピッチサイズと全体の大きさを決定する。CCD 上での PSF サイズが変わる要因として、点光源の大きさ、光路収差、回折があげられるがそのうち、光路収差と回折は結像レンズの大きさに影響される。今回は点光源は理想的な点光源で、光路収差の影響はないものとして点光源の PSF を仮定した。

## 2.2 中域モード・多点モード

広域モードによって鏡面の傾きを 0'.5 の精度で揃えたのち、実際の星の観測でより精度の高い鏡面測定を行うモード。鏡面測定には、まず望遠鏡によって集光した光を、コリメータレンズを用いてコリメートさせ、望遠鏡の主面と共役な出射瞳を作る。出射瞳上にマイクロレンズアレイを置き集光させることで、星像をマイクロレンズの数に分割し CCD アレイで星像の位置を検出。これによって各鏡の分割されたある範囲の鏡面の傾きを評価する。この方式のセンサーをシャック・ハルトマン波面センサーと呼ぶ。中域モードは、各鏡のある 2 箇所が作る星像の位置ずれから、1' の視野で、各鏡面の傾きを 0".1 の精度で図るモード。多点モードは、各鏡のある 6 箇所が作る星像の位置ずれから、各鏡面の歪みを 0".1 の精度で測定するモードである。広域モードと同様にレンズ、鏡の公式を用いて、1' の波面の傾きがある場合でも、隣り合うマイクロレンズの作る星像が重ならないように、また、0".1 の精度での測定が達成できるように、コリメータレンズ、マイクロレンズアレイ、CCD アレイの各パラメータを決定した。

## 3 Results

広域モード、中域モードでの各装置のパラメータを以下のようにきめた。これは市販の装置の組み合わせで十分実現可能であり、中域・多点モードは一つの装置で兼ねることが可能であることがわかった。

表 2: 広域モードパラメータ

レンズの焦点距離	50mm
レンズの直径	500 $\mu$ m 以上
CCD アレイピクセルサイズ	0.45 $\mu$ m 以下
CCD アレイサイズ	8.8mm 以上

## 4 Discussion

- ・フォトンノイズ、検出ノイズの検討
- ・重心計算における離散化ノイズ検討
- ・装置のパラメータ設計

表 3: 中域・多点モードパラメータ

コリメータレンズ焦点距離	7.5mm
コリメータレンズ直径	17.3mm 以上
マイクロレンズアレイピクセルサイズ	155 $\mu$ m 以下
マイクロレンズアレイサイズ	4.2mm 以上
CCD アレイピクセルサイズ	7.8 $\mu$ m 以下
CCD アレイサイズ	4.3mm 以上

まずフォトンノイズや検出ノイズの影響を計算して、各々のノイズが十分小さくなるような、観測条件を求め、離散化ノイズが小さくなるように装置装置のパラメータを決定し、中域モードと多点モードが一つの観測装置で観測可能かどうか検討した。

フォトンノイズ、検出ノイズの影響は 6 等星の観測では十分小さいことが分かった。次に重心計算時光強度を離散化してしまう場合に生じる誤差は 1pixel が PSF の半値幅以下であれば、その誤差が 1/100pixel であることがわかった。これらの結果に従い、各パラメータを見積もった。装置の今後の課題は、広域モードでの点光源の大きさ、収差の影響による検出誤差の検討、点光源の設置方法である。点光源の設置では、1 枚の分割鏡でそれに対応する、1 光源だけが観測できるように点光源を設置、設計する必要がある。隣の鏡に対応する光源の光をとらえてしまった場合、隣の光源の像を、隣の鏡が作る像と重なる位置に作ってしまうためである。すべてのモードで、光の強度を電子数という量子的な値にするために生じる量子化誤差や、より実際の PSF の形状を考慮した離散誤差の検討が必要である。

## 5 Conclusion

今回の設計で、要求仕様の検討、各モードでの装置設計、設計案ができた。また一つの装置での中域モードと多点モードの測定が可能であることがわかった。

装置設計に必要なパラメータの決定ができたので、今後は、今回考え無かった収差などのノイズ要因を含めたシミュレーションや、実際の望遠鏡と等価な光学系をによる実験でにより、市販の製品で実際に波

面センサが組み立て可能であるかどうか、ノイズの影響が取り除けているかどうかの検討、調整を行う。

## Reference

JE Nelson. and TS Mast. and SM Faber. 1985 authors.library.caltech.edu