

DOEを用いた月面天測望遠鏡(ILOM)の開発

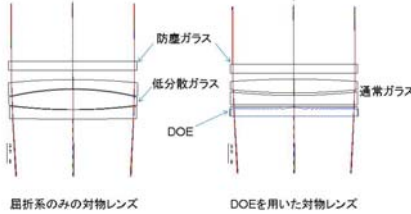
国立天文台 RISE月惑星探査検討室 ○鹿島伸悟、荒木博志、鶴田誠逸、花田英夫、安田進*、宇都宮真* (*JAXA)

なぜDOEか？

- ILOMは月面という過酷な環境で、星像位置決定精度1masという高精度を実現する必要がある
- 星像位置決定精度を悪くする要因は色々あるが、最も問題となるのが環境温度変化によるものである
 - ・ 納材の屈折率変化 ・ レンズの形状変化 ・ 枠等の形状変化
- ILOMは屈折系なので色収差を補正する必要があるが、そのためには所謂「低分散ガラス」を用いなければならない
- 低分散ガラスは、屈折率の温度変化(dn/dt)が一般硝材より1桁以上大きく、温度変化に非常に弱い
- DOEを使えば、上記低分散ガラス無しでも色収差が補正可能となり、硝材選択の自由度も増える
- 低分散ガラスを無くせるため、温度変化に強くなる

対物レンズ比較

屈折系のみでは色収差を良好に補正するため、下記の低分散ガラスが必須
このガラスのdn/dtが大きく、環境温度変化に弱くなる

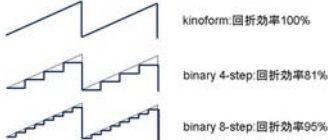


DOEの特徴

- 通常のレンズは「屈折」で光線を曲げるが、DOE (Diffractive Optical Element = 回折光学素子)は、その名の通り「回折」で光を曲げる
- 屈折と回折は色分散が逆であるため、色収差の発生方向が逆になる
- そのため、屈折レンズとDOEを組み合わせることにより、非常に強力な色収差補正が可能となる
- DOEの基板は比較的自由に選べるため、目的に応じて適切な材料を用いることができる(今回は石英を選択)
- ピッチ(溝間隔)を制御することにより、変曲点があっても良い自由な非球面レンズとしての効果もある
- ただし、回折効率の波長や形状への依存性が問題である

DOEの回折効率: 形状依存

- 理想的なキノフォーム(kinoform)であれば、特定の波長・垂直入射時の回折効率は100%になるが、binary近似ではそのステップ数に応じて回折効率が低下する
- 16-stepなら回折効率は99%まで上がる
- ちなみに、正弦波格子は6%、zone plateでは10%に留まる



DOEの回折効率: 波長依存

- 波長に比べてピッチが十分に広い場合は薄型近似としてスカラー理論で十分高精度に計算可能
- 一般にはピッチ > 10λであれば良いと言われている

$$S_m = \frac{1}{T} \int_0^T \tau(x) \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} m x) dx$$

$$\eta_m = |S_m|^2$$

$$\tau(x) = \exp(i\phi(x))$$

$$\phi(x) = 2\pi k x \quad (0 \leq x \leq 1)$$

ここで、
振幅Sはτ(x)の周期フーリエ変換強度
ηは振幅Sの絶対値の2乗
τ(x)は透過関数である
また、P=1として計算している

回折効率の波長依存性計算詳細

$$S_m = \int_0^1 \exp(i\phi(x)) \exp(-i 2\pi m x) dx = \int_0^1 \exp(2\pi i k x) \exp(-i 2\pi m x) dx = \int_0^1 \exp[2\pi i (k-m)x] dx$$

$$= \left[\frac{1}{2\pi i (k-m)} \exp[2\pi i (k-m)x] \right]_0^1 = \frac{1}{2\pi i (k-m)} [\exp[2\pi i (k-m)] - 1]$$

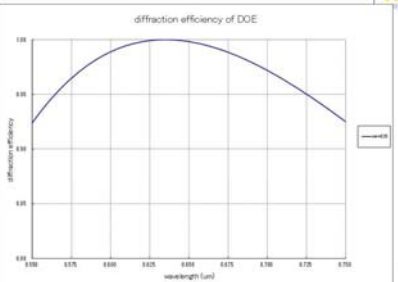
$$= \frac{\exp[2\pi i (k-m)] - \exp[-2\pi i (k-m)]}{2\pi i (k-m)} = \frac{\sin[\pi(k-m)]}{\pi(k-m)} \exp[i\pi(k-m)]$$

標準波長をλ₀、任意の波長をλとする

$$\eta_m(\lambda) = \left[\frac{\sin \pi m \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{n(\lambda_0)-1}{n(\lambda)-1} \right) - 1}{\pi m \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{n(\lambda_0)-1}{n(\lambda)-1} \right) - 1} \right]^2 \rightarrow \eta_m(\lambda) = \left[\frac{\sin \pi m \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right)}{\pi m \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right)} \right]^2$$

*: 波長の変化 >> 回折率の変化

回折効率の波長依存性

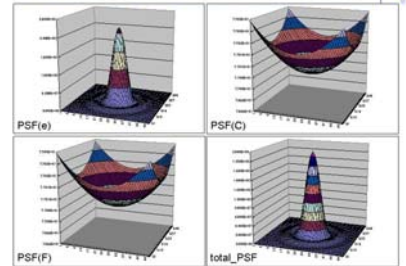


不要次数光の影響

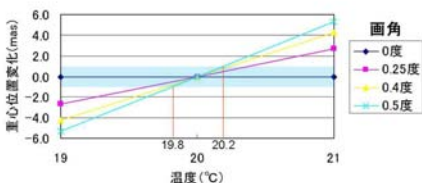
- 正確なkinoformで製造出来たとしても、基準(ブレード)波長と異なる波長に対しては回折効率が低下し、その分が不要次数光となる
- 不要次数光は迷光となって画像のS/Nを低下させるため、星像位置決定精度への影響を計算する必要がある
- 計算は、基準波長のPSFに、両端波長(約±100nm)のPSFに不要次数光の強度を掛けたPSFを足し合わせて評価した
- 式で書くと下記になる
total_PSF = PSF(λ₀) + [PSF(λ₊) * η(λ₊) + PSF(λ₋) * η(λ₋)]
但し、η(λ₊)、η(λ₋)は各々の波長での不要次数光強度
- 結果的には殆ど影響しないことがわかった

不要次数光考慮PSF

基準波長をe、両端をC/Fとしている。C/Fの不要回折率5%

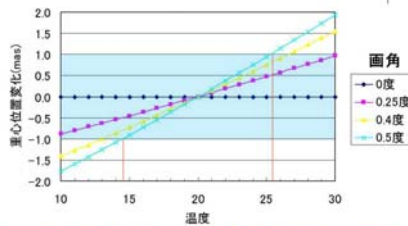


温度変化と星像中心位置の変化 従来の屈折系の対物レンズの場合



1masの精度に対する温度変化の許容範囲は約±0.2°C

温度変化と星像中心位置の変化 DOEを用いた対物レンズの場合

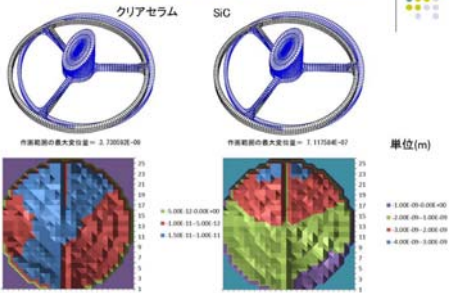


1masの精度に対する温度変化の許容範囲は約±5°Cに拡大!

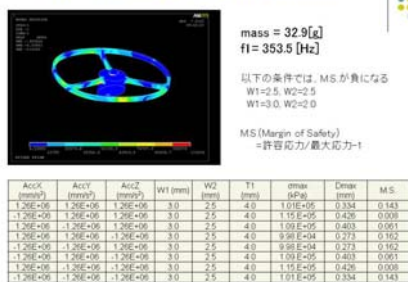
スパイダプリズムの検討

- ILOMはP5-014にあるように、水銀面で反射させて微小な勾配は相殺するPZT(写真天頂筒)の構成をとるため、反射望遠鏡の副鏡によく見られる構造で反射プリズムを支える必要がある
- この際問題となるのが以下の二つである
 - 温度勾配に伴う反射面の角度変化: 像ズレ<1masが必要
 - スパイダ部の強度: 光学的には「遮蔽」となるためできるだけ細くしたいが、打ち上げ時のGIに耐える必要がある
- これらに関する有限要素法を使って解析中であるが、まだ最終決定には至っていないため、計算例の一部を紹介するに留める

材質による変形量の差違 (by花田)



スパイダ部の強度解析 (by安田)



まとめと今後の課題

- DOEを用いることで、温度変化に強い光学系を設計することができ、月面で実現可能な温度範囲で所望の性能を実現することが可能となった
- DOEの欠点である不要次数光も、ILOMでは問題とならないことを示した
- PZT(写真天頂筒)という独特な構成に必要スパイダプリズムに関して解析が進み、実証的な解が得られつつある
- もうひとつの主要部位である水銀面(皿)に関しては、鶴田氏ホスター(P5-014)参照されたし
- 条件を明確にし、スパイダプリズムの材質と形状をFixさせる
- DOEに関しては中部大学工学部鈴木研、その他の光学部品や枠に関しては(有)岡本光学加工所に製造検討が始まっており、今期末(2013/03末)の完成を目指している