

小型JASMINEの光学系と迷光解析

国立天文台JASMINE検討室 ○鹿島伸悟、丹羽佳人、矢野太平、宇都宮真、郷田直輝、小林行泰、山田良透*、安田進**
(*京都大学、**JAXA)

迷光に対する要求

- 小型JASMINEでは、非常に厳しい星像中心決定精度である10 μ sを達成する必要があるため、そのためにはノイズとなる迷光(観測光以外の光の混入)を十分に低減させる必要がある
- 10 μ sを達成するための、迷光に対するシステムからの要求は175[photon/sec/pix]である
- 検出器のピクセルサイズは10 μ mなので、上記はエネルギー換算で2.5e-13[W/mm²]となる
- 太陽からのエネルギーフラックスは1.3e2[W/m²]と計算されるため、望遠鏡の口径と検出器の画素数を考慮して、**太陽減光率は2e-11**という凄まじい値となる
- 最小で23度の方向に地球を見るため、当初はこの方向からやってくる太陽光に対して、上記太陽減光率を達成しようとしていたため、非常に長大なフードが必要であった

太陽からのエネルギーフラックス

- 太陽半径 $R_s=6.96e8$ [m]
- 太陽までの距離 $D_s=1.5e11$ [m]
- 太陽を見込む立体角 $\Omega_s=\pi*(R_s/D_s)^2$
- 太陽表面温度 $T_s=5.9e3$ [K]
- 単位振動数あたりの強度 $I(\nu)=\frac{2h\nu^3}{c^2} \times \frac{1}{\exp(h\nu/kT)-1}$
- エネルギーフラックスに換算 $F(\nu)=I(\nu)*\Omega_s$
- 観測波長 λ_a から λ_b のエネルギーフラックス
$$F_{sun} = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} F(\nu) d\nu$$
 ここで、 $\nu_a=c/\lambda_a$ 、 $\nu_b=c/\lambda_b$
- 波長領域を1.1-1.7 μ mとすると $F_{sun}=1.3e2$ [W/m²]

Point Source Transmission Curve

- 地球で散乱された太陽光による迷光を計算するには、Point Source Transmission Curveが必要となる
- これは迷光源の入射角を横軸に、その際の迷光量を縦軸にとったグラフである
- 正確にはサジタル方向とメリジオナル方向の2方向に対して計算すべきだが、フードの形状が極端に非対称でない場合は、メリジオナル方向だけで十分である
- PST curveを使って、衛星フードから見込む地球表面の角度の関数としてこれを積分し、トータルの迷光量とするのである
- また、このカーブは周回軌道平均を考える際にも有効である
- JASMINEは運用期間のデータ全てを積算して解析するため、少し迷光量が許容値を超えている期間があっても、総和でクリアしていれば精度を達成できるからである

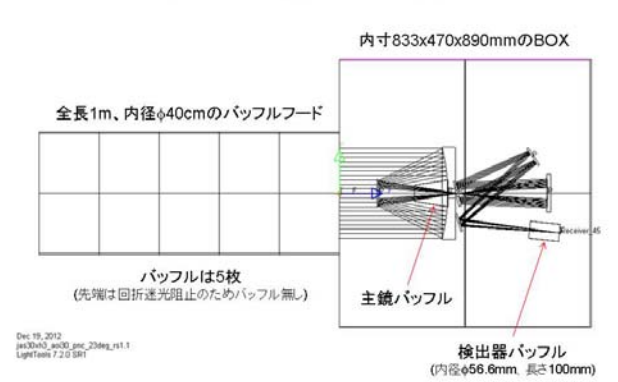
PSTカーブ計算条件;主要内面処理

- ノミナルはVel-Blackであるが、サンプルが直ぐに入手できず、次点のベルトロン(京都パイル)の値で、現状最終的なPSTカーブを計算することにした
 - 共にカーボンを含んだ素材の植毛であるため、それほど差はないと考えている
 - 実測値のグラフより、以下のように半球反射率(SSR)を読み取った(70度以上は急激に大きくなるが精測不能)
- | 入射角 | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| SSR(%) | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 1.0 |
| 30度植毛換算 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
- 一番下は30度(傾斜)植毛に対する換算半球反射率である
 - LightToolsは補間ではなく丸め込みでSSRを決めるが、差が小さいためこの分割数で十分と考える

その他の部分の条件

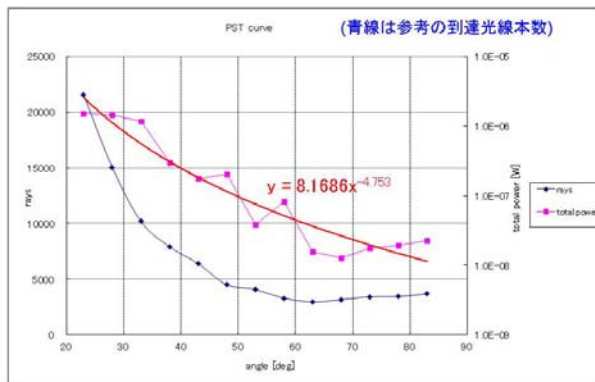
- ベルトロンのSSRは、パッフルフード・主鏡パッフル・検出器パッフルに適用する
- 望遠鏡BOXの内面はブラックカプトンを想定していたが、散乱特性を測定したところ、非常に正反射成分の強いガウスであった
- ガウスだと2桁以上悪くなり仕様を満たさないため、ブラックカプトンの内側(上)にPNCを施すよう変更した
- PNCもSSRは大きい、ほぼランバート散乱である
- PNCのSSRの実測値、及びそこから決めたSSRの入射角度特性は次スライド参照
- 望遠鏡BOXの大きさは現状構造設計に準拠する
- 現状未確定の副鏡支持部等の細かいところは未考慮とする

計算に使ったモデル



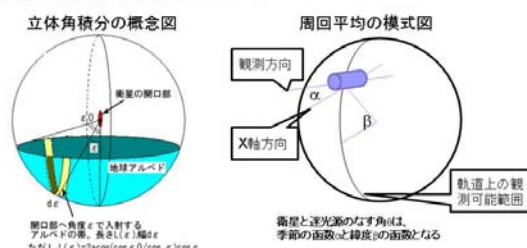
PSTカーブ;計算時間約1週間!!

計算誤差は10~30%、平均21%程度、赤線が累乗近似曲線

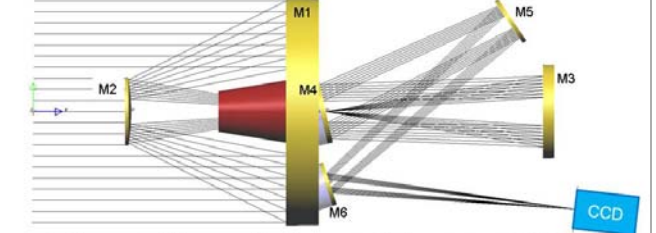


立体角積分と周回平均

- PSTカーブが求まったので、これを用いて衛星開口部が地球を見込む立体角で迷光量を積分する必要がある
- 当然地球周回上の位置によって積分範囲は変化し、周回平均が許容値以下であることが必要となる
- 季節によっても位置関係が変化するため、全てを考慮した計算はそれほど容易ではなく、今後明確にしていく



アライメント手順



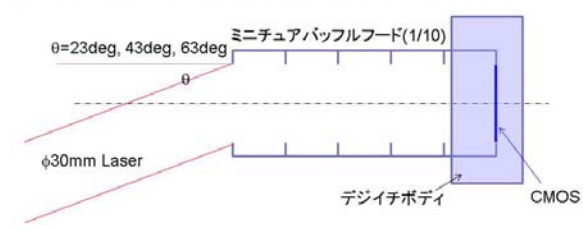
1. 主鏡(M1)・副鏡(M2)・第3鏡(M3)の非球面ミラーは軸対称配置なので、コリメータ等で心を確認しつつ調整、間隔は機械精度
2. M4とM6は主鏡と一体であり部品精度でアライメント精度保証
3. M4上の光束がM6の中心に当たるようにM5を調整
4. CCD位置を調整して像心と焦点を合わせればアライメント完了!!

迷光実測実験の必要性

- 内面処理の特性等は実測値を用いて、これまで数多の迷光計算を行って来たが、**LightToolsによる計算結果を実験で確認したことはない**
- 世界中で実績のあるソフトであるが、ミッション提案が採択された後には、一度実測して計算が正しいことを確認しておく必要がある
- 全系で実験をするのは大変なので、パッフルフードの部分だけの縮小モデルを作製し、これを用いて迷光を実測することを考える
- 総量だけでなく、分布も測定したいため、CCD等の面検出器が望ましく、デジタル1画素レフのCMOSを使う予定である
- 光源には可視(赤色)レーザ(He-Ne、或いはLD)を用いる予定である

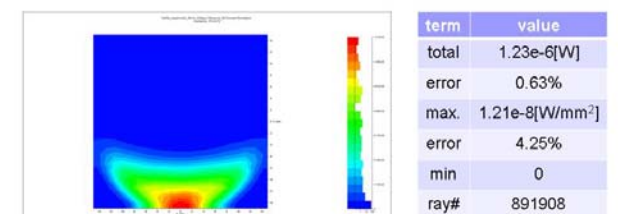
迷光測定実験の構成

- 実際のパッフルフードは内径 ϕ 30cm、外形 ϕ 40cm、長さ1mであるが、これを1/10に縮小した模型を作製する
- つまり、**内径 ϕ 3cm、外形 ϕ 4cm、長さ10cm**とする
- 内面処理はFMと同じVel-Blackにする
- 入射角度を下図のように変え、デジイチで撮影する



計算結果:43度入射

- 内面特性をLambert 0.5%とし、内径 ϕ 3cmに1Wの光を入れた場合の計算結果を示す
- レーザのガウス分布は未だ考慮していない(考慮可能)
- Meshは21x21、入射照度は1.415e-3[W/mm²]である
- 総量で6桁、Maxで5桁程度の減衰である



デジカメのISO感度

- デジカメのISO感度は以下のように定義されている

$$ISO = \frac{10}{H_m} = \frac{10 \times F^2}{0.65 \times B \times T}$$

- ここで、F:絞り値、B:輝度[cd/m²]、T:露出時間[sec]であり、H_mは像面露光量と言われるもので、[lx·sec]の次元をもつ

- 光度[cd] = 放射強度[W/str]であり、1[cd]=1/683[W/str]@667nm(=540x10¹²Hz)

- 照度[lx] = 放射照度[W/m²]であり、1[lx]=1/4 π [cd/m²]=1/2732 π [W/str]@667nm

$$ISO = \frac{10}{H_m} = \frac{10 \times F^2}{0.65 \times B \times T} = \frac{10 \times F^2}{0.65 \times \frac{1}{683} [W/str \cdot m^2] \times T [sec]} = \frac{10507.7 \times F^2}{T} [str \cdot m^2 / W \cdot sec]$$

$\Rightarrow \frac{1}{ISO} = \frac{T}{10507.7 \times F^2} [W \cdot sec / str \cdot m^2]$ ∴ ISOが倍になると、露光時間は半分が済む

具体的な計算結果

- デジイチとしては、以前RISEで購入したCanon EOS 5Dを借りる予定にしているが、その仕様を下記する
 - CMOSのサイズ:約36x24mm(縦が少し足りないがやむなし)
 - ISO:100~6400(25600の感度拡張も可能)
 - シャッタ速度:30~1/8000[sec]
- シャッタ速度を10[sec]からにすると、ダイナミックレンジは6400*8000*10/100=5.12e7となり、7桁以上ある
- 光量としては、1/6400=1.56e-4[W·sec/str·m²]=1.56e-10[W·sec/str·mm²]まで感度があるようである
- レーザの出力を10[mW]とすると、最大照度でも1.21e-10[W/mm²]なのでぎりぎりである
- レーザのパワーを上げるか、拡張感度を使う必要がある
- EOD-1DならISOが51200までであるが・・・?

まとめと今後の予定

- 迷光に関してはPSTカーブの計算も終了し、立体角積分と周回平均を行うだけとなった
- 光学系もほぼFixし、アライメント手順も明らかにしたが、実際の組立条件を考慮した詳細な公差解析を行い、現状の構造で調整可能かどうかを見積もる必要がある
- 実際の光学調整はメーカーに依頼するため、その下準備でもある
- 迷光実測実験の計画を立案した
- デジイチのボディでダイナミックレンジ的には問題無いが、光学的には少々厳しい可能性がある
- ISOを上げる・レーザの光量を上げる等で対策できれば良いが、無理ならデジイチは諦めてイチから検出系を作る必要があるため、その見極めを行う