

V241a
JASMINE望遠鏡
新規光学系設計検討

国立天文台

JASMINE Project

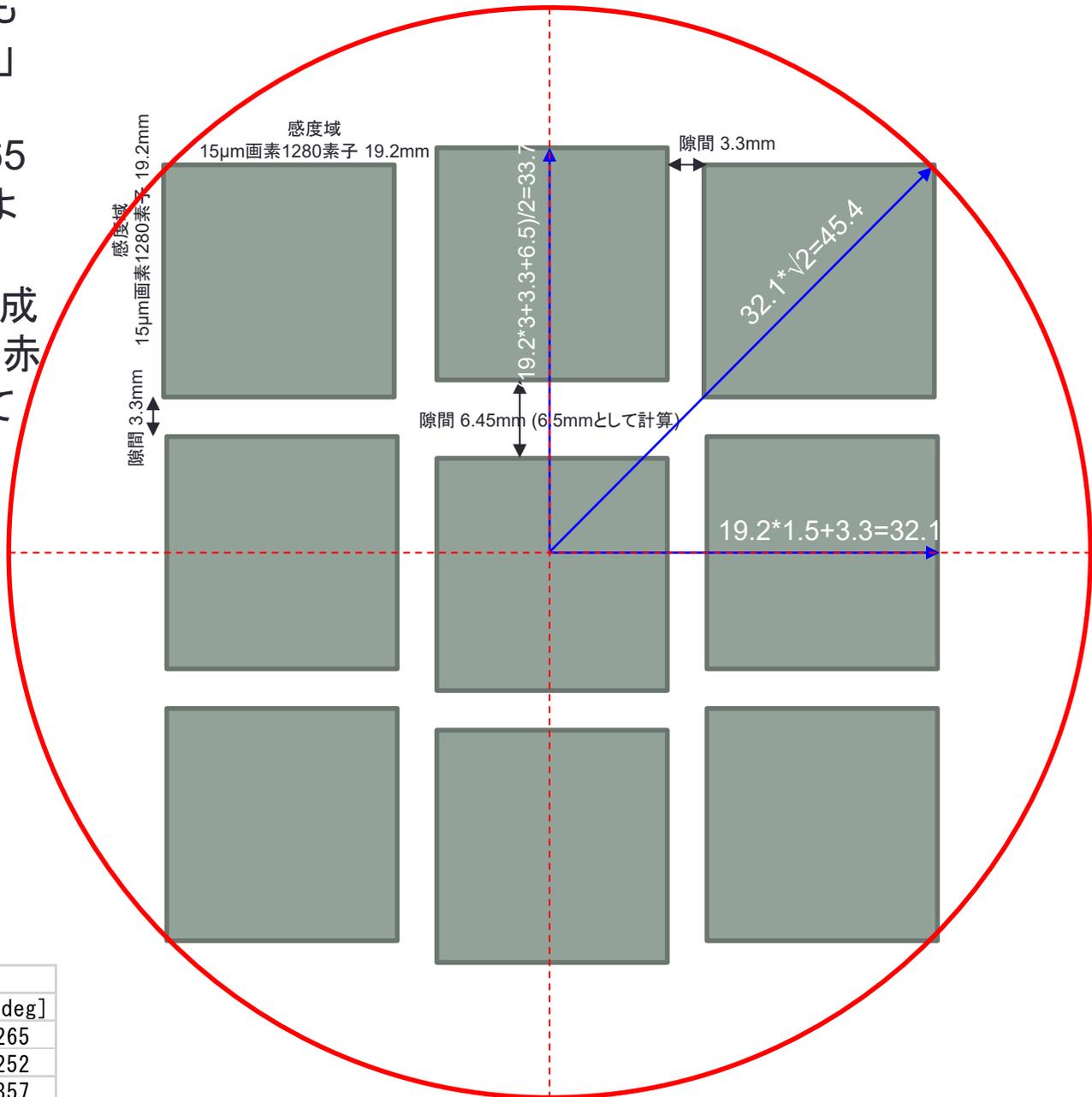
鹿島 伸悟

小型JASMINEプリプロジェクト候補チーム

背景：検出器変更

- 当初より、この分野の検出器としては**唯一無二のTeledyne H4RG**を想定していたが、**唯一無二というのはリスク**でもある
- そこで、予てより地上望遠鏡用として国立天文台で開発が行われて来た国産検出器を宇宙用化し、搭載する方向で開発を進めている
- 但し、H4RGとはピクセルサイズもピクセル数も異なる為、光学系の大幅な見直しが必要となる
- 具体的には、Teledyne H4RGがピクセルサイズ $10\mu\text{m}$ 、ピクセル数 4096×4096 、開発中の国産検出器はピクセルサイズ $15\mu\text{m}$ 、ピクセル数 1280×1280 となる
- そのため、ほぼ同様の視野を得るには国産検出器を **$3 \times 3 = 9$ 個**を並べる必要がある
- 当然、光学系の焦点距離は大幅に長くする必要があり、また、ピクセル当たりの光子数の問題で、口径も大きくする必要はある
- 一番簡単なのは、光学系を先端フード含めて係数倍することであるが、これでは**到底フェアリングに納まらない**ため、新規設計が必要となった

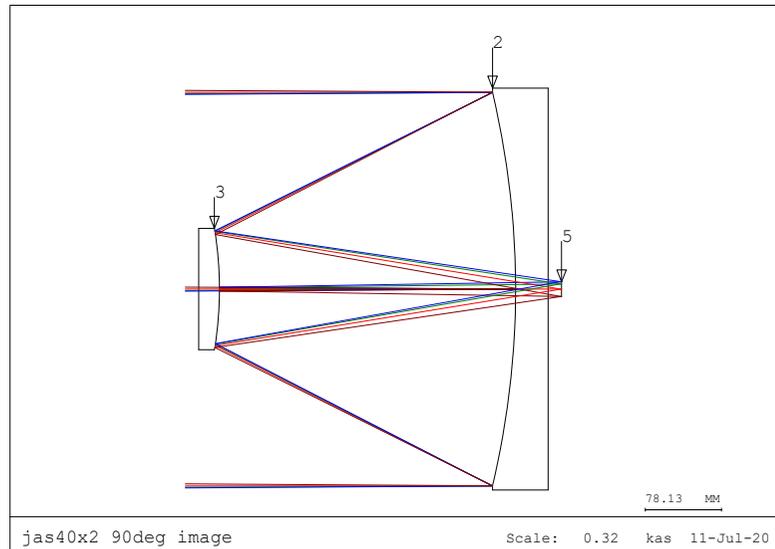
- ・3x3の配置としては色々なものが考えられるが、「対称性」を重視し、右図のようにした
- ・この時、最大半画角は0.265度となり、従来のJASMINEより少し小さくなる
- ・実際はこのような焦点面構成となるが、設計(収差補正)は赤丸で示した外接円内で行っている



画角換算(f=7292.3)

レイアウト3				
x [mm]	y [mm]	x [deg]	y [deg]	max [deg]
0	33.7	0.000	0.265	0.265
32.1	0	0.252	0.000	0.252
32.1	32.1	0.252	0.252	0.357

設計方針1



EFL	1243.0296
BFL	47.1371
FFL	-3028.2543
FNO	3.1076
IMG DIS	47.1371
OAL	303.4242
PARAXIAL IMAGE	
HT	7.3764
ANG	0.3400
ENTRANCE PUPIL	
DIA	400.0000
THI	303.4242
EXIT PUPIL	
DIA	149.2376
THI	-416.6300

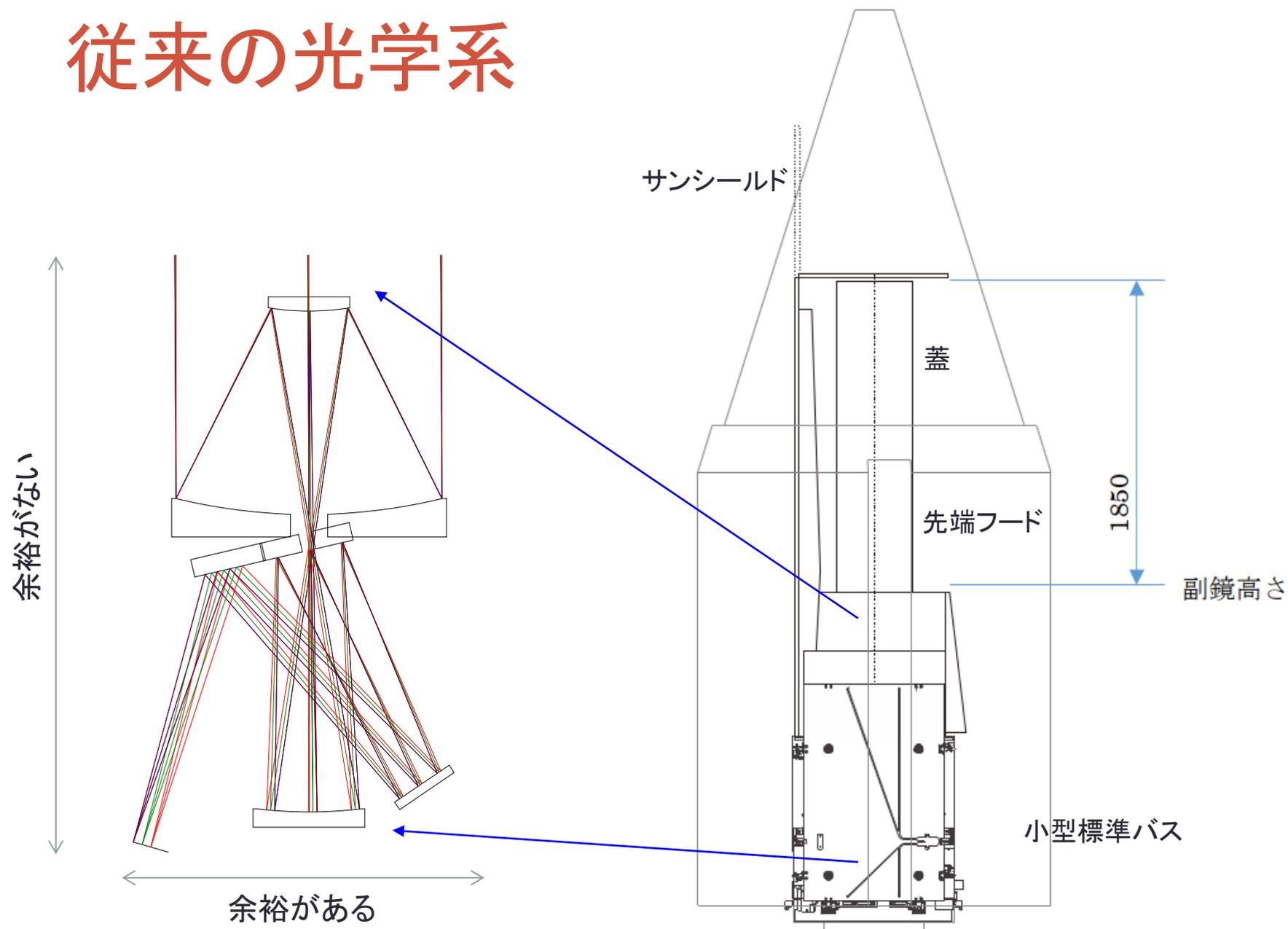
- 左図は、新設計のものだが、現行設計を40/30=1.33倍に掃除拡大しただけなので、各近軸量の比率等は現行設計と同じである
- 主鏡・副鏡の関係はあまり変えたくないため、まずはM3だけを変更することを考えた
- 副鏡から中間像位置までの距離は、左記のIMG DISとOALの和になるので、約350mm
- 焦点距離は1243なので、テレフォト比を焦点距離/バックフォーカス距離とすると、1243/350=3.55となり、既に結構テレフォトになっている
- これは意図的に行ったことではなく、副鏡を小さくして隠蔽率が小さくなるよう設計したことによる結果である
- 現行設計でも主鏡のF#は小さく、かなりパワーが強いため、これ以上は避けた方が賢明と思われる
- 設計は当然可能だが、公差がかなり厳しくなるからである

- 国産検出器のピクセルサイズは15 μ mであるため、PSFのサンプリング数だけの問題であれば**焦点距離を1.5倍**すれば良いが、それだとピクセル当たりの光子数が不足するため、**口径も ϕ 40cmに拡大**する必要がある
- 口径拡大(4/3倍)によるPSF径縮小も考慮し、結局焦点距離は、**1.5*4/3=2倍の7.714m**にする必要がある
- つまり、先端フードを含めて、現行の光学系スペースに、**口径 ϕ 40cm、焦点距離7.714m**の光学系を収める必要があることになる

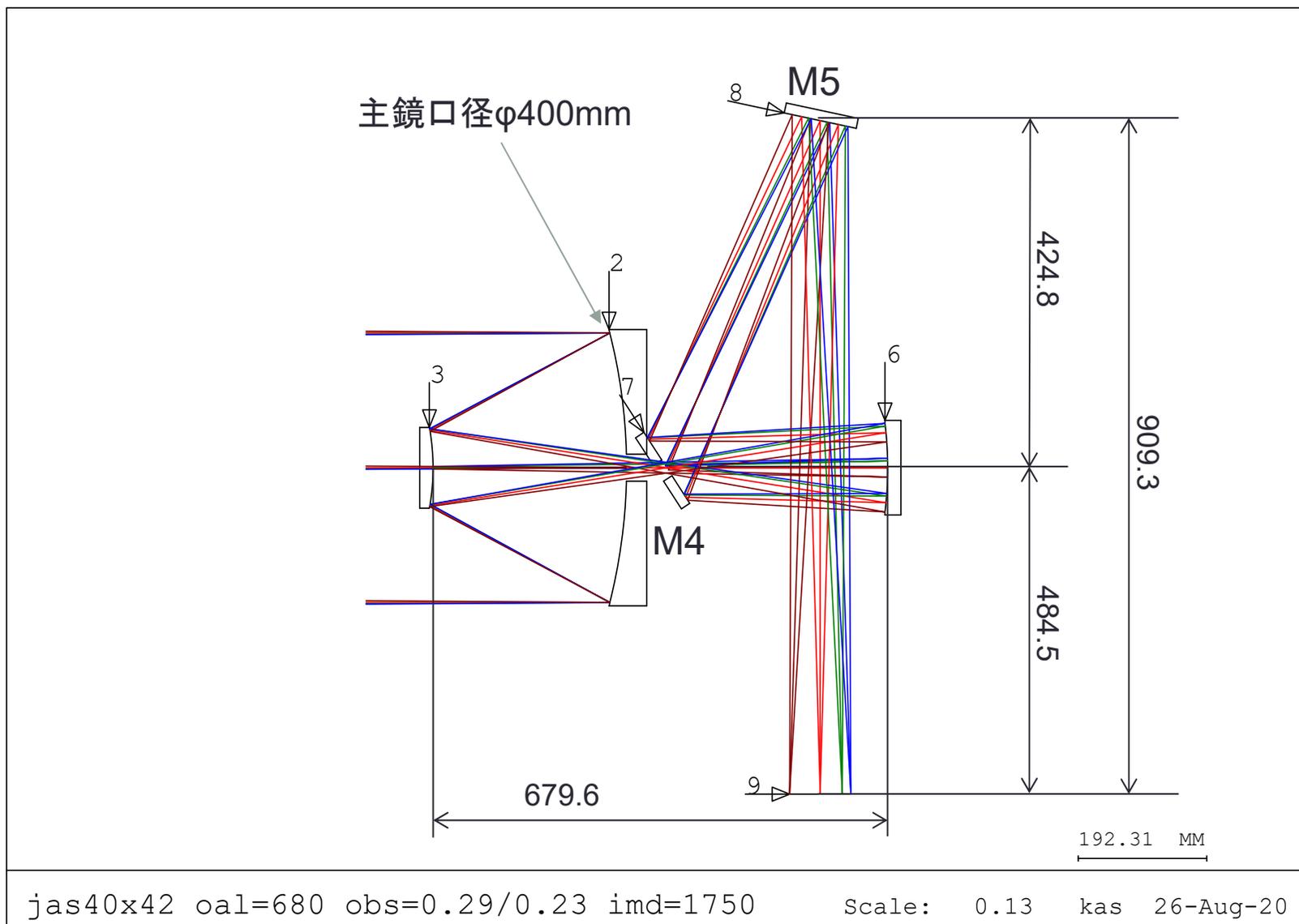
設計方針2

- 前頁より、1.33倍にした主鏡・副鏡の合成焦点距離は1.243mであるため、M3でこれを $7.714/1.243=6.2$ 倍に投影すれば所望の焦点距離(7.714m)を有する光学系が得られる
- 但し、これをコンパクトに収める必要があるため、従来品のようにIO距離(物体像間距離)を大きく取って投影するわけにはいかない
- そのため、M3を中間像位置に近づけ、Rを小さく(パワーを大きく)してIO距離を短かくする
- 但し、M3から像面までの光学系をあまり小さくすると、M4の穴でのケラレが副鏡によるケラレより大きくなるため、限度がある
- 現行品では、縦方向に3回折り曲げているが、この方向には全然余裕がないため、横(光軸直交)方向に2回折り曲げる構成にした
- 望遠鏡と検出器の温度が大きく異なる為、こうすると光軸に直交する方向に温度勾配が付き、それが問題になるかと懸念したが、熱設計をキチンと行えば問題ないとのこと
- このレイアウトでは、従来の光学系で懸念されていたM6のローカル変形の問題がなくなる(そもそもM6がなくなる!)ため、かえって有利な一面もある

従来の光学系

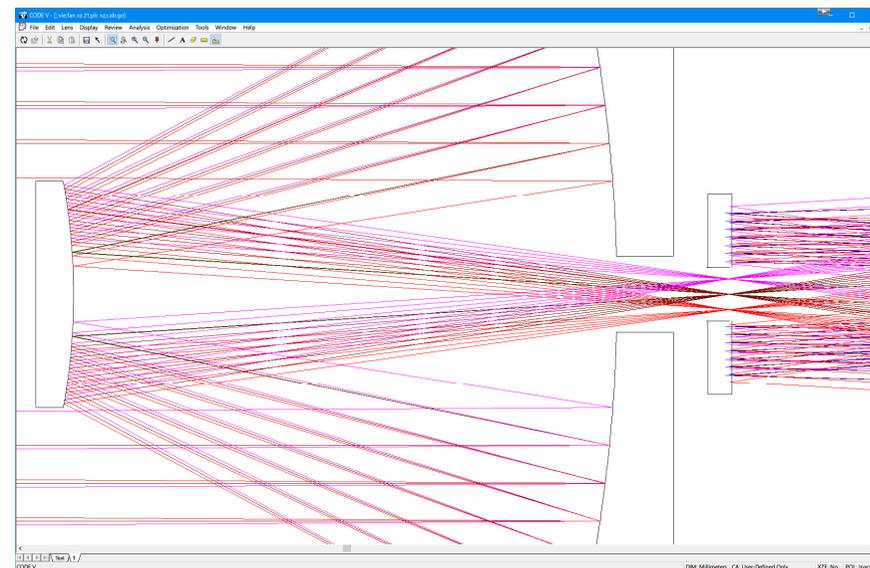
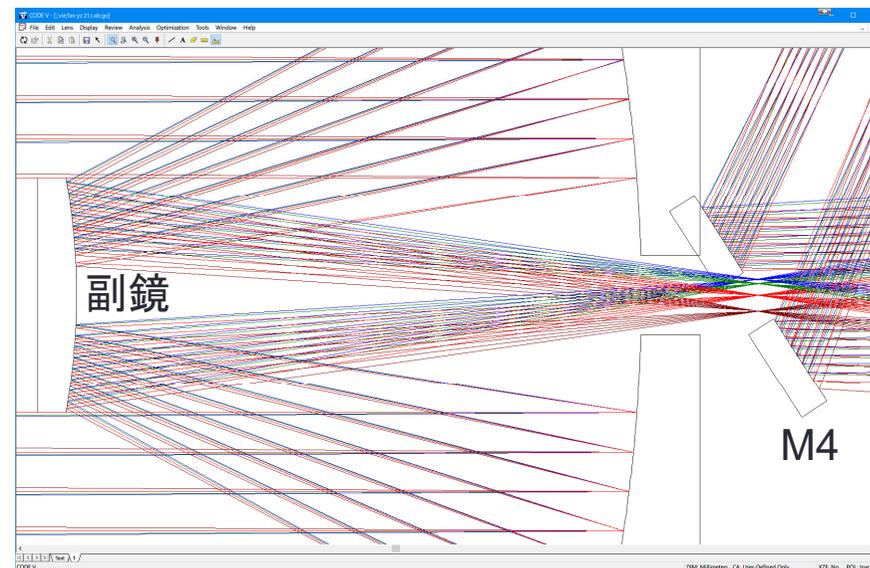
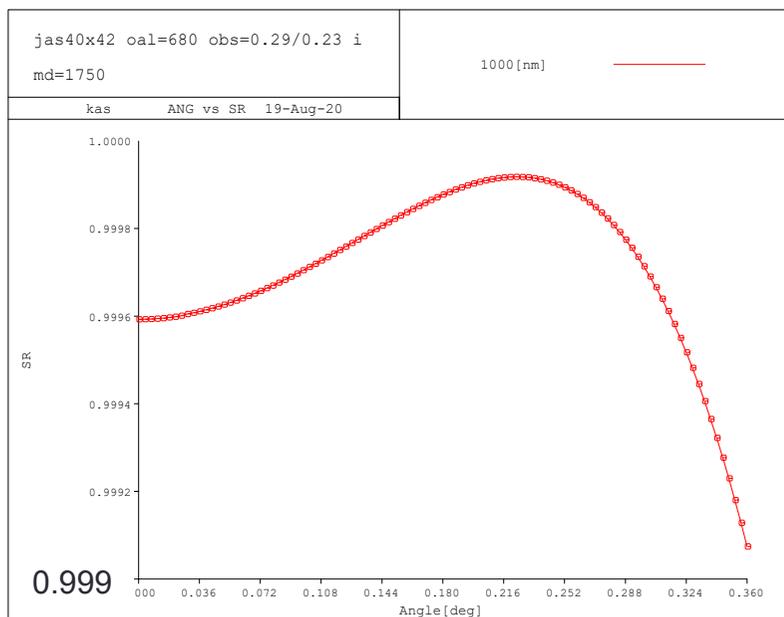


現状ベストモデル

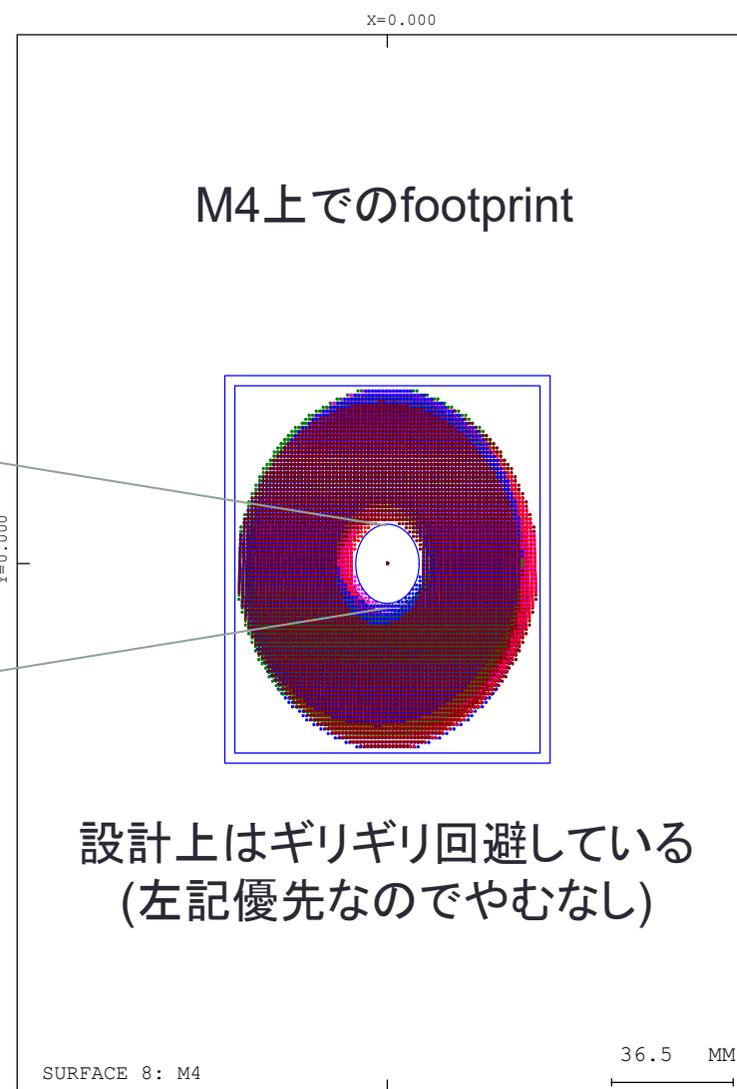
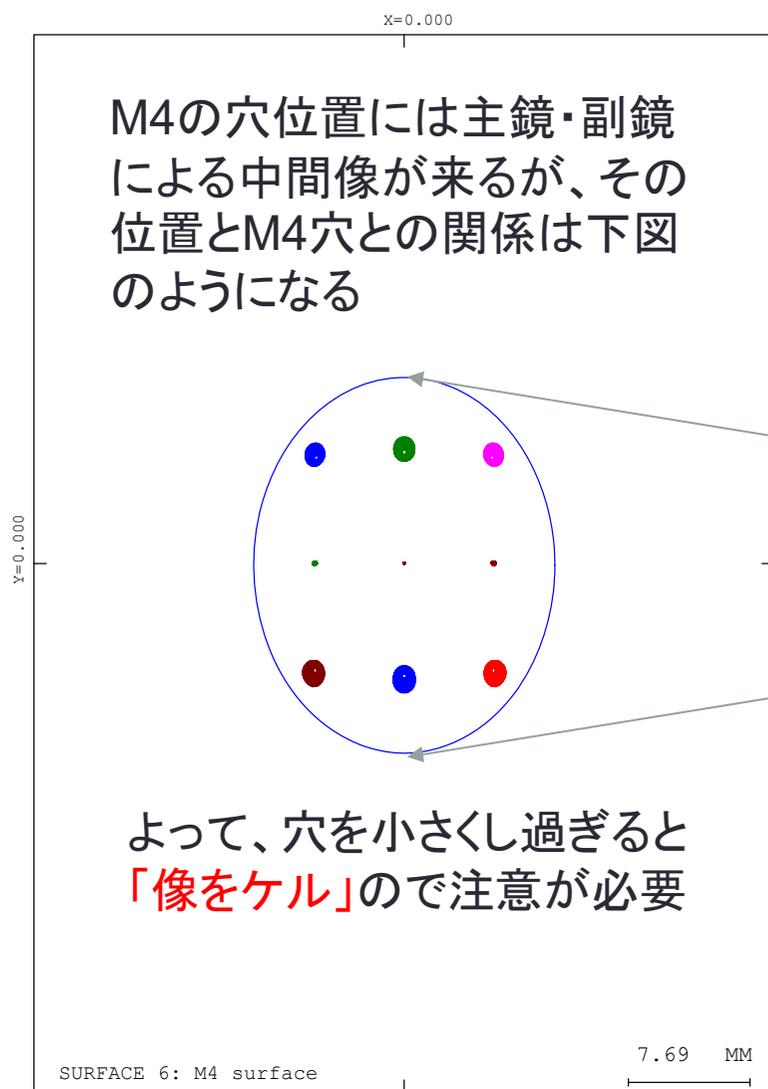


波面収差と光線遮蔽

- 右図は、M4の穴による光束のケラレを示すものであり、上がyz断面、下がxz断面である
- 副鏡の直ぐ外側を通る光線と、M4の穴とのクリアランスがかなり厳しいところが見て取れる
- 収差補正等よりも、このクリアランスを確保することの方が余程難しい



M4位置での中間像とM4上の光束



kas 21-Aug-20
jas40x42 oal=680 obs=0.29/0.23 imd=1750

kas 21-Aug-20
jas40x42 oal=680 obs=0.29/0.23 imd=1750

内面処理変更

- JASMINE望遠鏡光学系は、内面処理として植毛(Vel-Black)を想定して迷光解析を行い、許容値をクリアしてた
- 開発が進みメーカーとの検討に入ると、いくら特性が良くても、宇宙実績がなく、また接着剤を大量に使う植毛(Vel-Black)は採用し難いとの見解があった
- この植毛(Vel-Black)は、JWSTへの採用を目指して開発されものであり、当然宇宙仕様であるため問題無いと考えていたが、結局搭載が見送られた
- 宇宙仕様が問題になったのではなく、より特性が良いVantablackに切り替えられたのである
- Vantablackはカーボンナノチューブであり、特性は非常に良いが、非常に高価でもあるため、JASMINEには採用できない
- 従来の1.1mというフード長は、サンシールドも伸展なしで、フェアリングに入るギリギリのサイズであり、この長さで迷光許容値を実現するためには、特性の良い植毛を採用する必要があった
- メーカーとの議論のなかで、サンシールドを折り曲げるのはほとんど問題無いことが明らかになったため、サンシールドは折り曲げ可としてフードを延長することで、特性の劣る内面処理でも迷光に対する要求を満たせないかを検討した

サンシールド折り曲げ

- 図2は、小型標準バスとイプシロンロケットのフェアリングサイズを考慮した際の、フード長見積もり図である
- サンシールドの折曲げは許容すると、先端フードは最大1.85mまで搭載可能である
- ギリギリを狙うのはリスクがあるため、図1のように、従来の1.1mを1.6mにまで伸ばして迷光解析を行った
- ちなみに、この構成であれば、サンシールドの折り曲げ部分を、先端フードの「蓋」として使えるため、思わぬ効果を生んだ

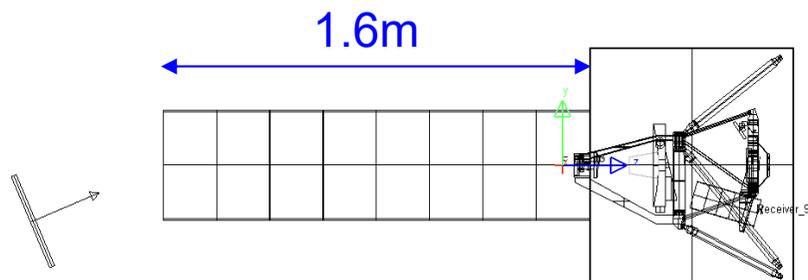


図1

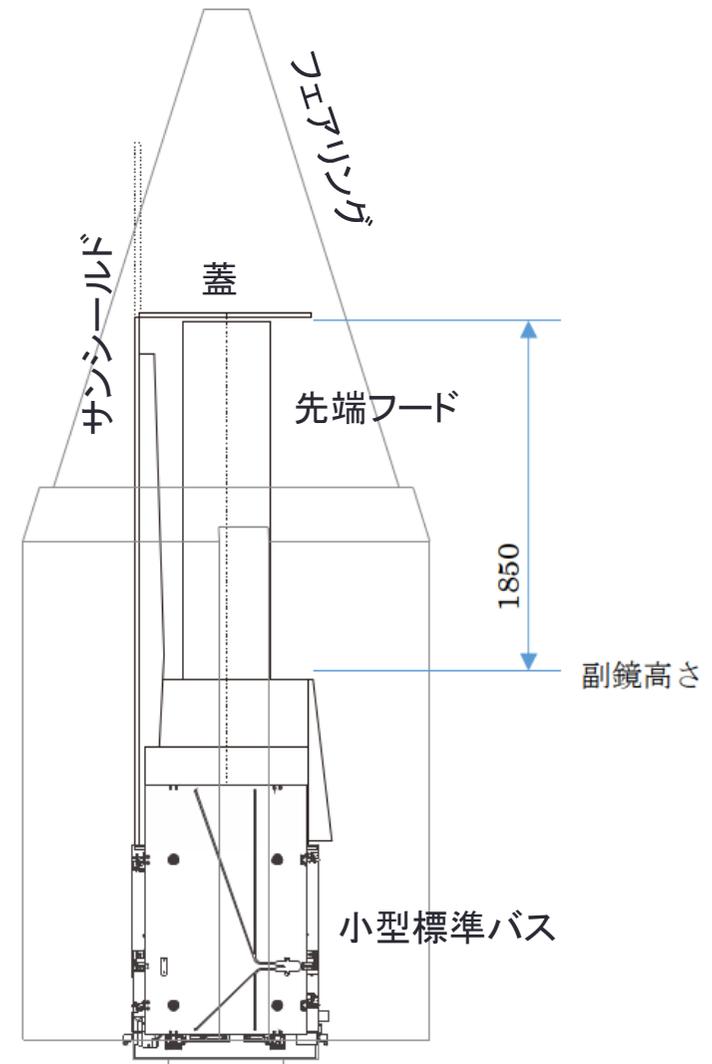
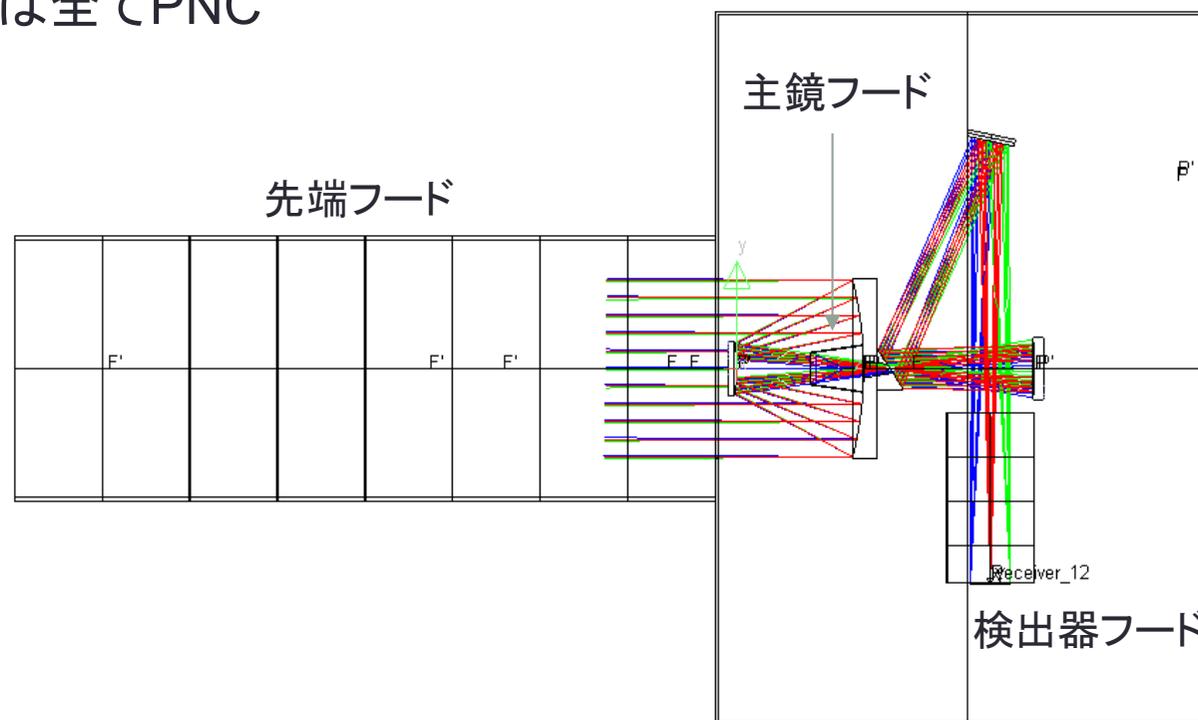


図2

迷光解析モデル

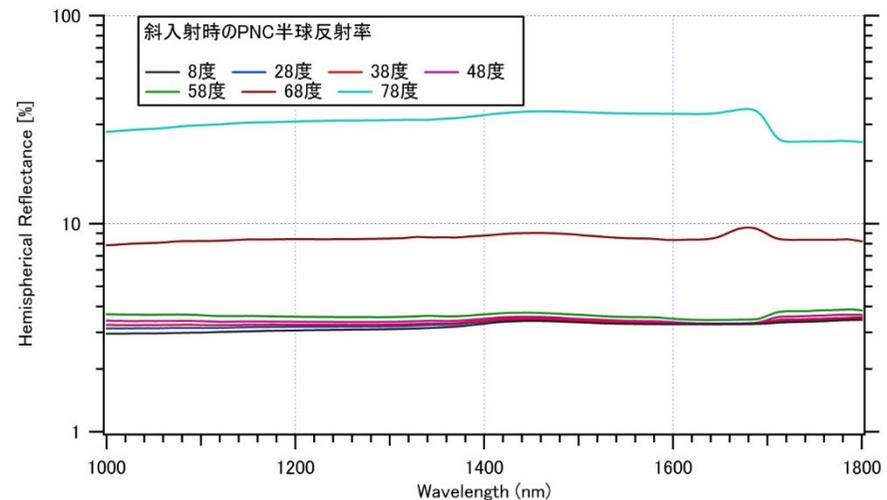
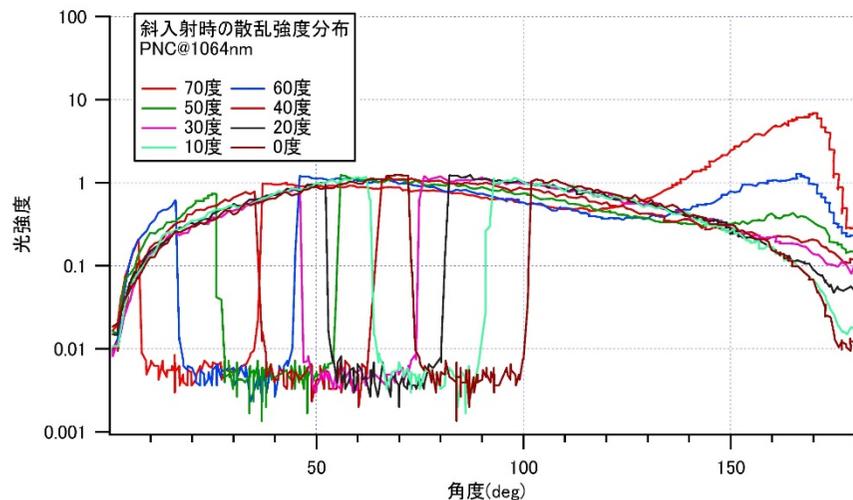
- BOXサイズは従来品を模擬したもので、仮置きである
- 先端フードの外径は60cm、長さ1.6m、バツフル間隔20cm
- 検出器フード外径は20cm、長さ38cm、バツフル間隔10cm
- 内面処理は全てPNC



Box:1135x840x1605[mm]

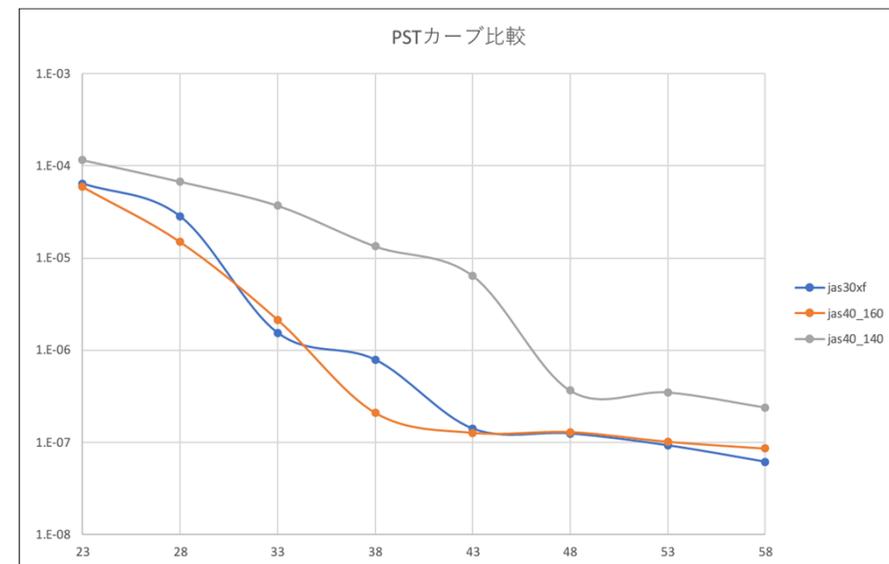
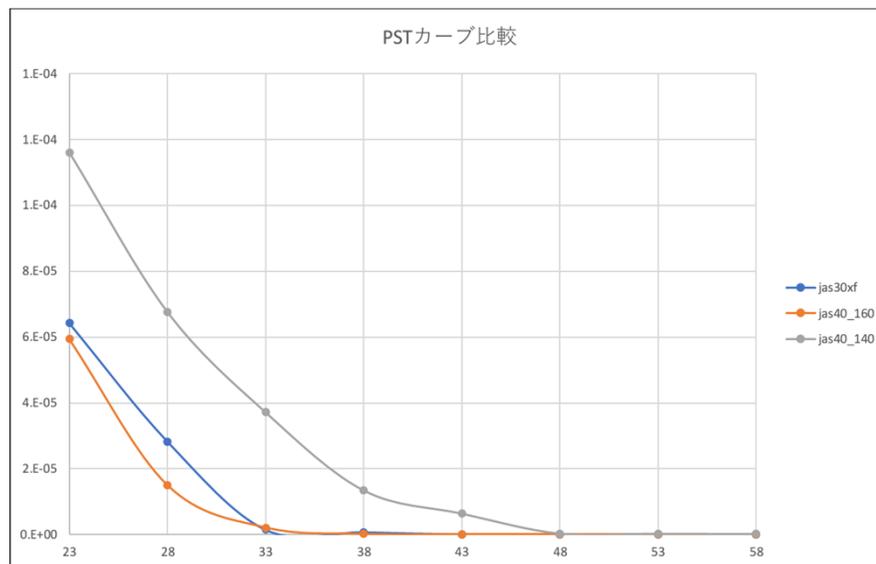
採用したPNCの特性

- 可視での垂直入射に対する特性が良い内面処理は結構あるが、近赤外・大角度入射時にも特性、特に散乱特性がLambertをキープするものは数少ない
- PNCは元々、望遠鏡BOX内面処理として想定していた、仏Map社が開発したものであり、ESAやCNESで十分な実績がある
- 大まかな特性はインハウスで測定済みであり、今回はそれを用いた
- より正確な実測データ等は、Map社にてサンプルを作製してもらい、こちらで実測する予定である
- 下図は、以前インハウスで測定した簡易的な散乱特性と半球反射率のグラフであるが、入射角が大きくなっても、そこそこLambert特性をキープしている

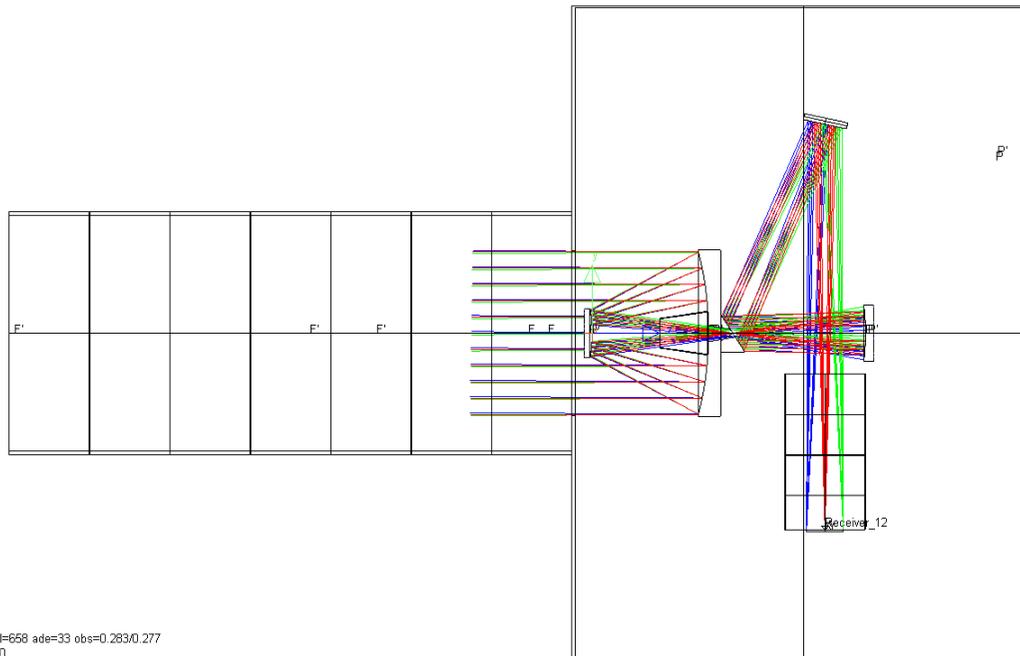
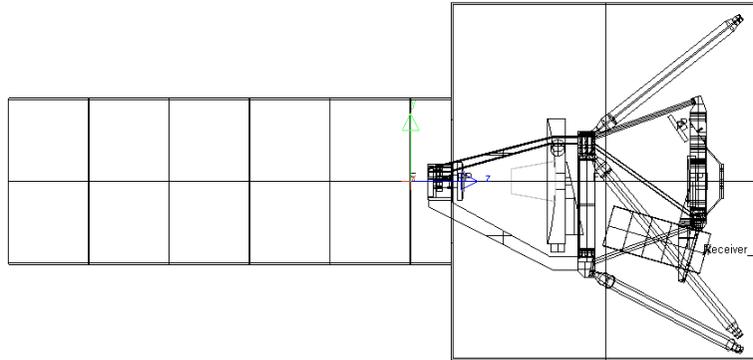


PSTカーブ比較

- あまり時間をかけても意味が無いので、23～58度までを5度刻みで計算
- 先端フードの長さは1.6mと1.4mで計算、比較の口径φ30モデル(jas30xf:フード長1.1m with 植毛)も載せる
- 左はリニアスケール、右は対数スケール
- φ40モデルの計算値の誤差は8~21%程度であり、口径φ30モデルの数倍悪い
- フード長1.6mならほぼ同じ、1.4mは結構悪いため、23度までは無理かも知れないが、どこまでOKかの計算は容易ではない



等倍での比較



- 結局、当初の口径 $\phi 30\text{cm} + 1.1\text{m}$ 先端フードから、口径 $\phi 40\text{cm} + 1.6\text{m}$ 先端フードに変更になったことで、図のように大きくなった
- JASMINEの場合、比較的質量には余裕があったため、各種材質を変更する必要はなさそうである
- スーパースーパーインバーをCFRPにする必要があったとしたら、コスト的にアウトである
- 但し、主鏡は肉抜きすることになりそうである

まとめと今後の展開

- 現在、この設計データで衛星メーカーと検討が進んでいる
- 若干、クリアランス的に厳しいところもあるが、概ね今回のサイズでフェアリングに納まることは確認された
- アライメント設計はメーカーの責任において実施して貰うが、それに先立ち、公差解析はインハウスで進めておく必要がある
- 位置天文望遠鏡であるため、いわゆる光学性能(波面収差)とは別に、解析込みの星像位置決定精度を達成できるかどうかの解析も必要である
- 先ずは、望遠鏡BOX内の温度をどの程度の精度で制御する必要があるかを知るため、支柱熱変形による偏心解析を進めている(ミラーは変形しない)
- これは、構造解析⇒光学解析⇒星像位置解析という三つのステップがあり、現在光学解析が終わったところである
- 迷光解析に関しては、高精度の解析には非常に長い時間がかかり、2度手間は避けたいので、PNCの実測データ待ちである
- 現状、アルミ・CFPR・GFRP(ガラエポ)・クリアセラム(ミラー側面等)にPNCを付ける可能性があるため、これらの基板作製をメーカーに依頼中である
- 基板作製(メーカー)⇒PNC塗布(Map社)⇒散乱特性実測(外部企業)という段取りで進行中である