

第21回宇宙科学シンポジウム
g04-03:
JASMINE光学系の概要と変遷

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 I : 内面処理

- JASMINE望遠鏡光学系は、当初口径 ϕ 30cm、焦点距離3.86m(F#=13)のコーシェ改良型の望遠鏡の先端に、内面処理として植毛(Vel-Black)を採用した、長さ1.1m・外径 ϕ 40cmの直筒バツフルフードを組み合わせたものとして開発が進められた
- 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
- 1.1mという長さは、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

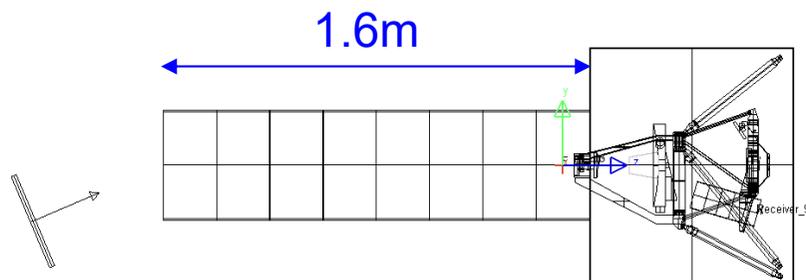


図1

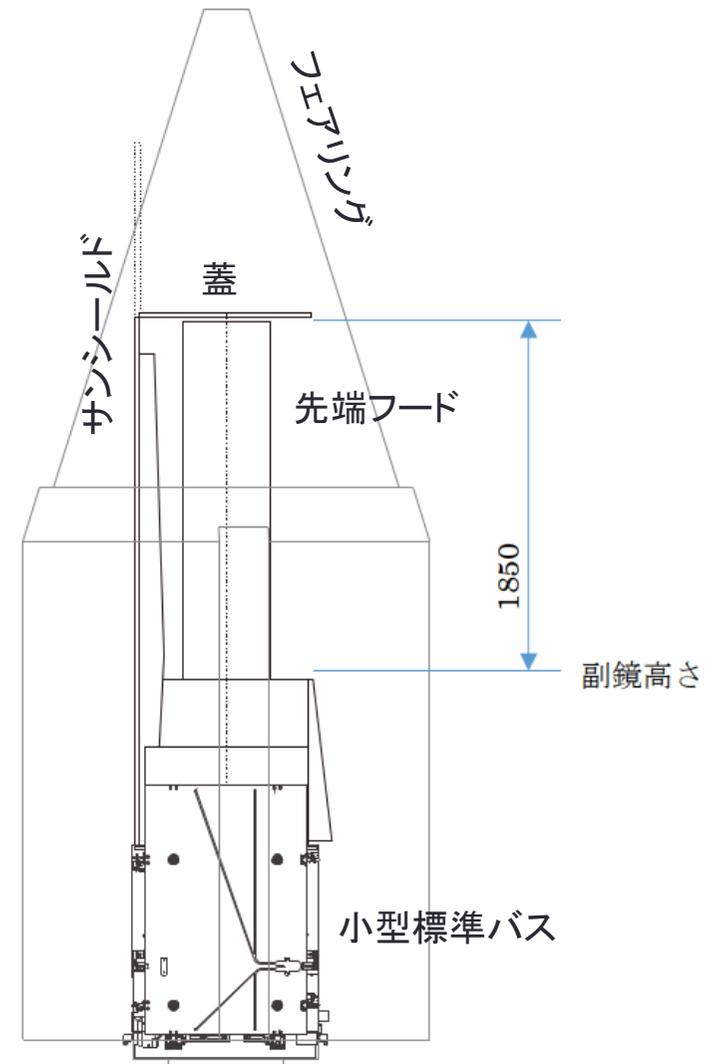
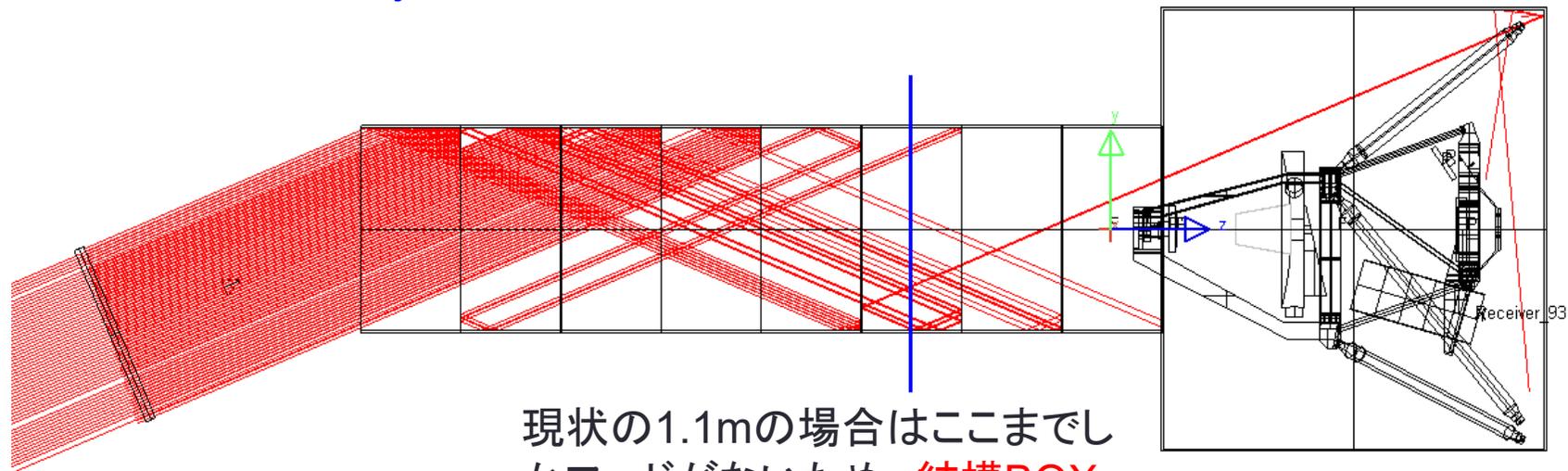


図2

ミラー面として解析

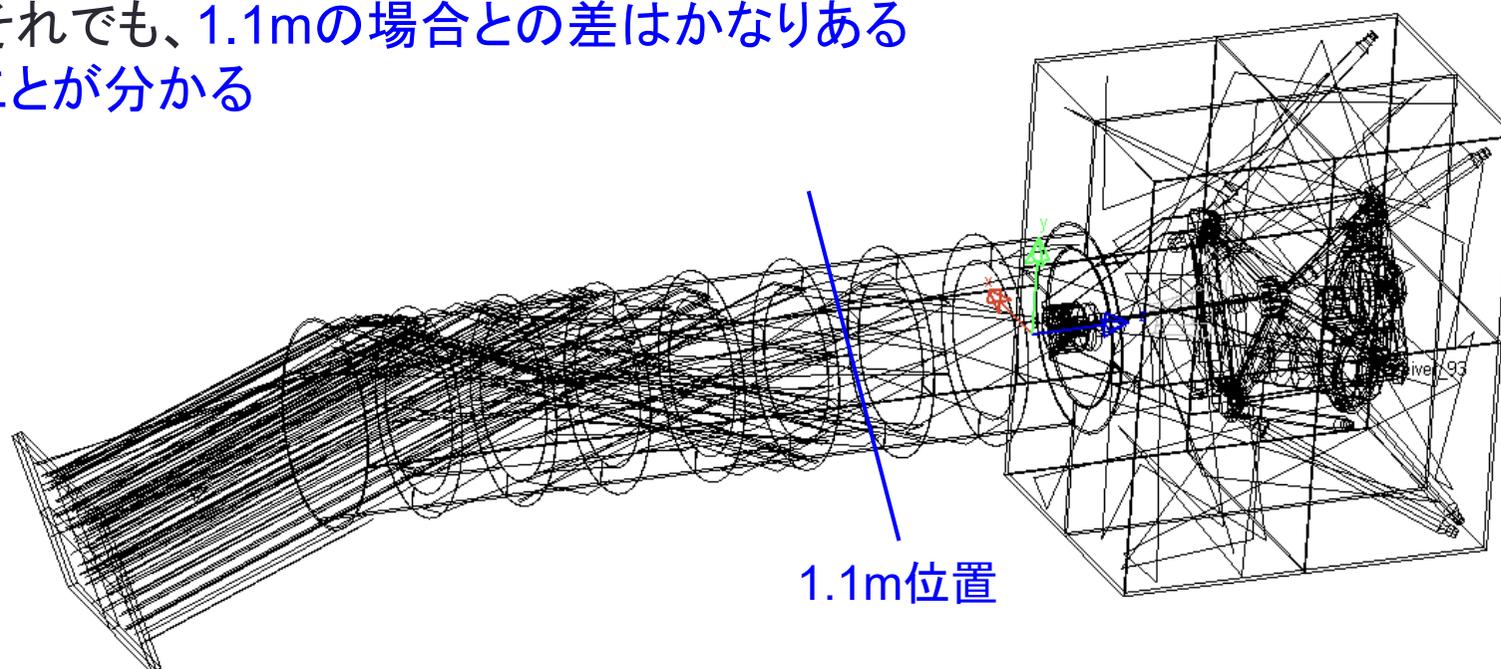
- 先ずはバッフルとフード内面をミラーにして、23度方向から平行光を入れた場合を考えてみた
- フードが長いことと、バッフルも増えていることにより、反射光は殆ど望遠鏡BOXに入射していない
- 但し、あくまでもyz断面図での話である



現状の1.1mの場合はここまでしかフードがないため、**結構BOX**にも入っている

全方向から光線を入れた場合

- 前頁に比べて、多くの光線がBOX内に侵入しているのが分かる
- それでも、1.1mの場合との差はかなりあることが分かる



迷光解析結果

- 内面処理とフード外径を換えた場合の結果を下表に示す
- BOX内というのは、中にも2箇所(主鏡・検出器)フードがあるため、それらの内面処理をどうしたかということである
- スラッシュの後の数字は計算誤差[%]であるが、十分時間をかけて計算していないため、従来計算結果に比較すると誤差が大きい
- 1.1mフード+植毛の場合の値が $6.43e-5$ /誤差2.48%であるため、誤差を考慮しても、全ての場合で現行値を桁で下回っていることが分かる
- 前頁でも示したように、先端フードに関してはやはり絶対的な物理長が重要であり、極力後段に迷光が行かないようにすることが肝要であることが分かる

フード形状	1.6m baffle hood/外径φ40cm		1.6m baffle hood/外径φ50cm	
	BOX内植毛	BOX内同じ処理	BOX内植毛	BOX内同じ処理
Lambert 10%	3.26e-6/13.88	4.43e-6/12.67	4.09e-6/16.91	4.80e-6/14.21
Gauss 10% 15deg	7.04e-6/10.30	7.95e-6/8.68	6.32e-6/13.22	9.15e-6/9.91
PNC	1.55e-6/19.32	1.80e-6/14.76	9.93e-7/17.67	1.18e-6/17.39

背景Ⅱ：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、予てより国立天文台で開発が行われて来た、**国産検出器**の搭載を視野に入れた開発を進めている
- 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
- 具体的にはピクセルサイズが $10\mu\text{m} \Rightarrow 15\mu\text{m}$ 、ピクセル数が $4096 \times 4096 \Rightarrow 1280 \times 1280$ となり、ほぼ同様の視野を得るには $3 \times 3 = 9$ 個を並べる必要がある
- 一番簡単なのは**先端フード含めた光学系全体をスケール倍**することであるが、後述するように、これでは**フェアリング内に到底納まらない**
- 現状光学系では、1.6mの長さがあれば桁で迷光量が少なくなっていたため、まだ短くする余地があると思われる
- そこでフード長の見直しを行い、どこまで短くしても現状並みの迷光レベルに抑えられるかをまず検討した

フード長見積もり

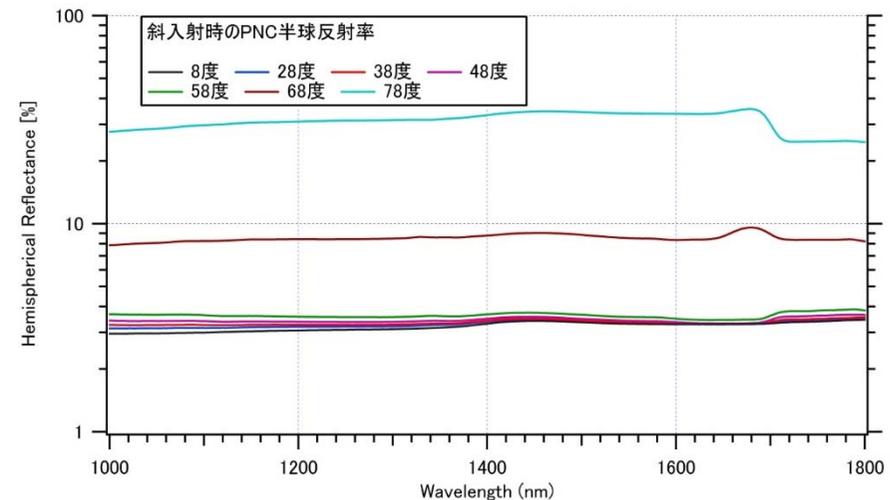
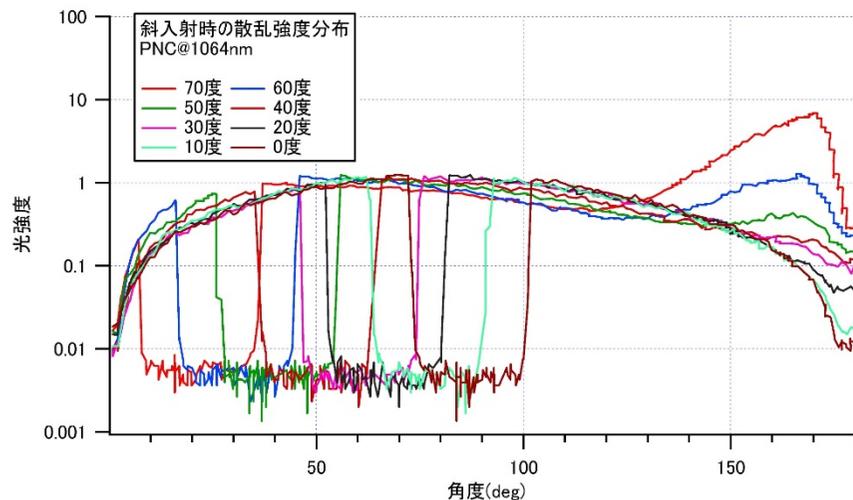
現行23度入射
総量 $6.43e-5$ /誤差2.48%

内面処理	フード長	迷光総量	誤差[%]	Rays
Lambert 10%	1.6m	$4.43e-6$	12.7	21億
Lambert 10%	1.4m	$5.98e-5$	14.5	10億
Lambert 10%	1.3m	$1.79e-4$	16.0	10億
Lambert 5%	1.3m	$5.35e-5$	24.6	10億
Lambert 2%	1.3m	$1.37e-5$	37.5	10億

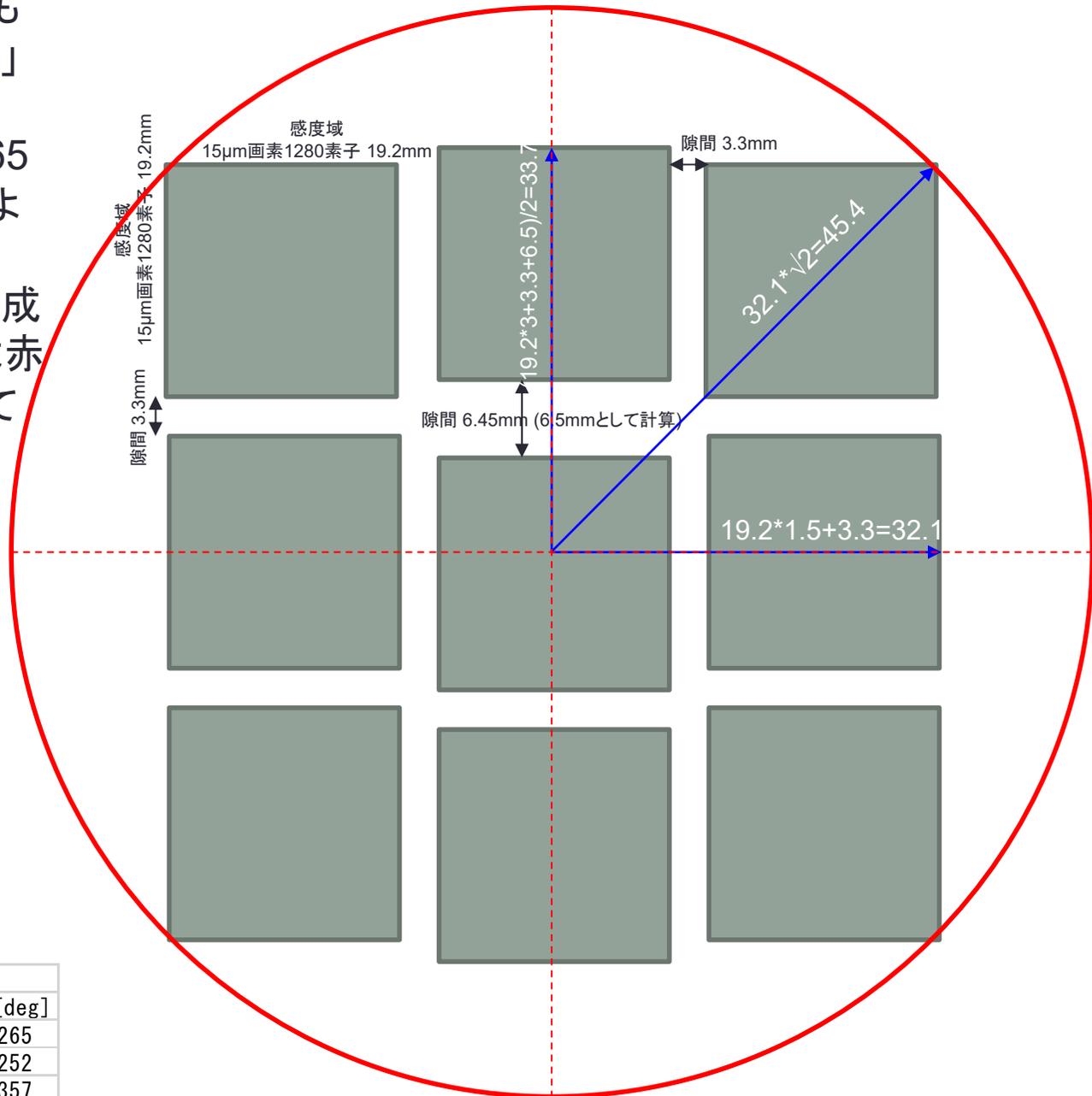
- フード長を1.6mとすると、口径拡大率 $4/3$ (後述)をかけると2.1mとなってしまう、望遠鏡部(の長さ)を今以上に短くする必要があるが、この条件下では、**あまりに光学系のスペースが小さく、設計不可能**と思われる
- 上記値を見ると、1.6mは1桁以上迷光が少なくなっており、ここまでの長さは必要ないと思われるため、長さを縮めつつ、迷光総量を計算してみた
- 結果、1.3mでも、内面処理がLambert 5%程度より良ければ、迷光基準をクリアすることが分かった
- その場合、新設計のフード長は $1.3 \times 1.33 = 1.73m$ となり、現状スペースに収まる
- 更に詳細検討を行ったところ、半球反射率よりも、散乱特性ができるだけLambertであることが重要であることが分かったため、内面処理候補はPNCとした

PNC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



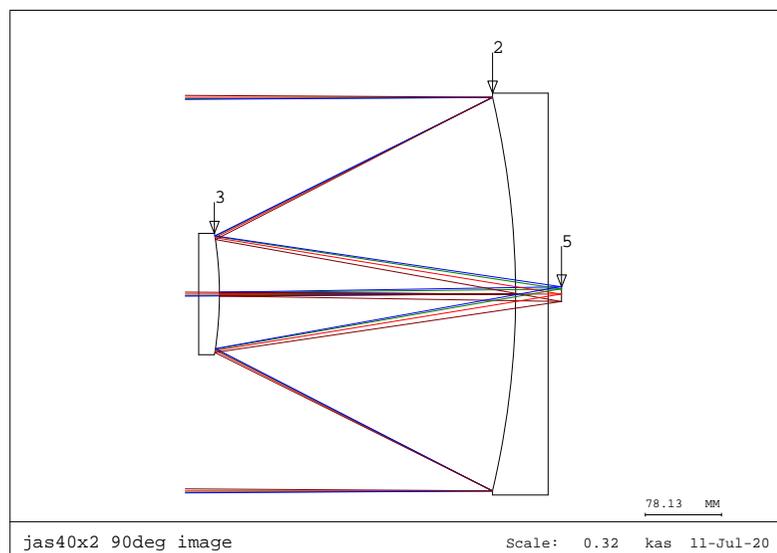
- ・3x3の配置としては色々なものが考えられるが、「対称性」を重視し、右図のようにした
- ・この時、最大半画角は0.265度となり、従来のJASMINEより少し小さくなる
- ・実際はこのような焦点面構成となるが、設計(収差補正)は赤丸で示した外接円内で行っている



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

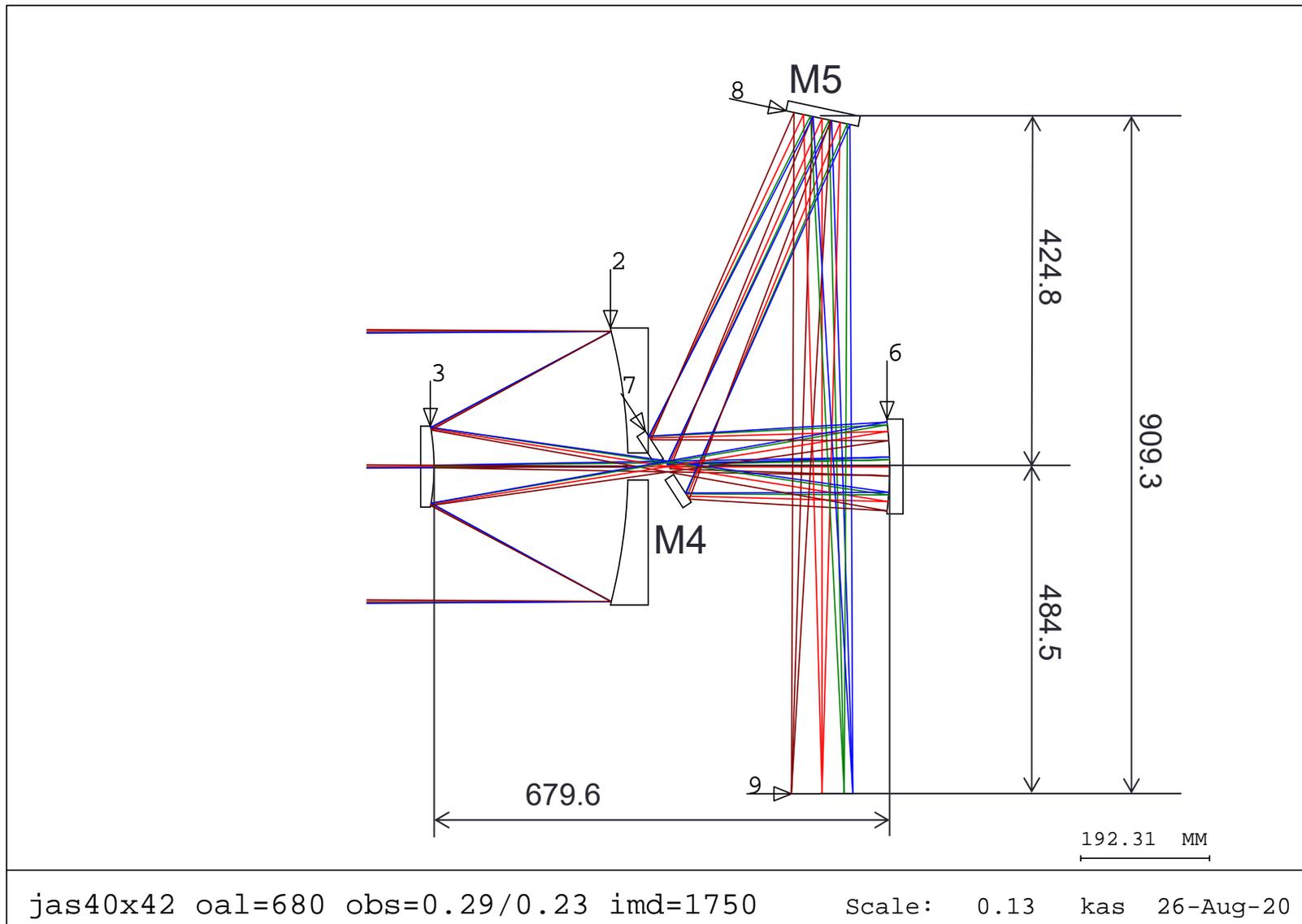
- 左図は、新設計のものだが、現行設計を40/30=1.33倍に掃除拡大しただけなので、各近軸量の比率等は現行設計と同じである
- 主鏡・副鏡の関係はあまり変えたくないため、まずはM3だけを変更することを考えた
- 副鏡から中間像位置までの距離は、左記のIMG DISとOALの和になるので、約350mm
- 焦点距離は1243なので、テレフォト比を焦点距離/バックフォーカス距離とすると、1243/350=3.55となり、既に結構テレフォトになっている
- これは意図的に行ったことではなく、副鏡を小さくして隠蔽率が小さくなるよう設計したことによる結果である
- 現行設計でも主鏡のF#は小さく、か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
- 口径も4/3倍に大きくなるため、結局焦点距離は、 $1.5 \times 4/3 = 2$ 倍の7.714mにする必要がある
- 先端フードに関しては、現状と同じスペースに収まりそうであるため、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

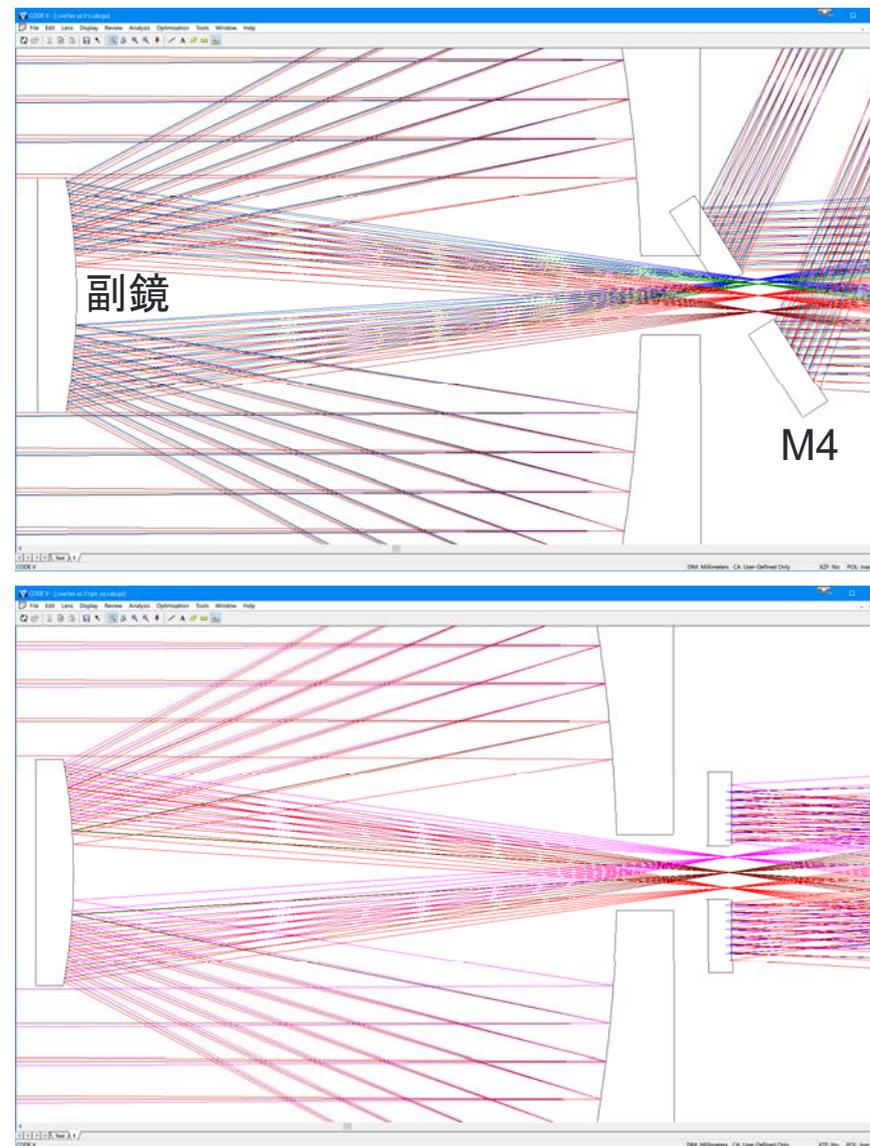
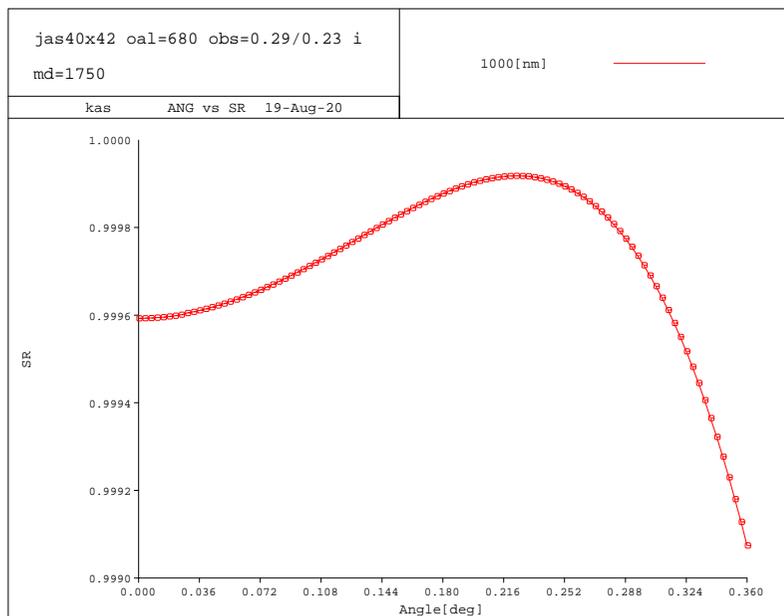
- 前頁より、1.33倍にした主鏡・副鏡の合成焦点距離は1.243mであるため、M3でこれを $7.714/1.243=6.2$ 倍に投影すれば所望の焦点距離(7.714m)を有する光学系が得られる
- 但し、これをコンパクトに収める必要があるため、従来品のようにIO距離(物体像間距離)を大きく取って投影するわけにはいかない
- そのため、M3を中間像位置に近づけ、Rを小さく(パワーを大きく)してIO距離を短かくする
- 但し、M3から像面までの光学系をあまり小さくすると、M4の穴でのケラレが副鏡によるケラレより大きくなるため、限度がある
- 現行品では、縦方向に3回折り曲げているが、この方向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

jas40x42: 現状ベストモデル

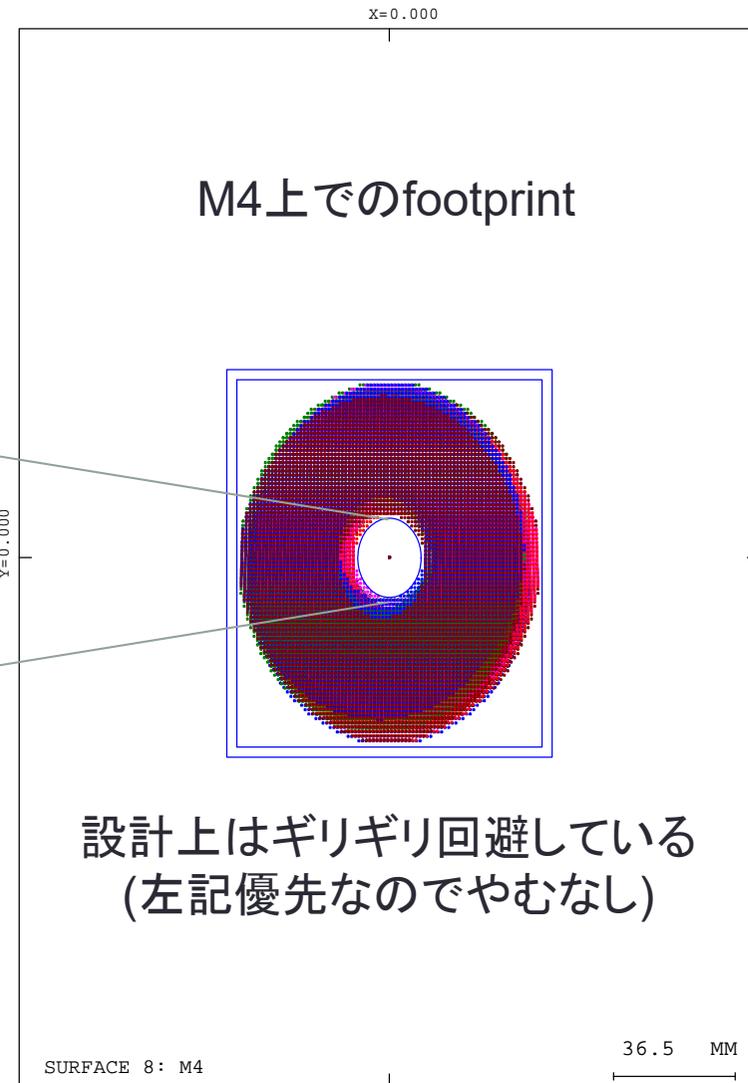
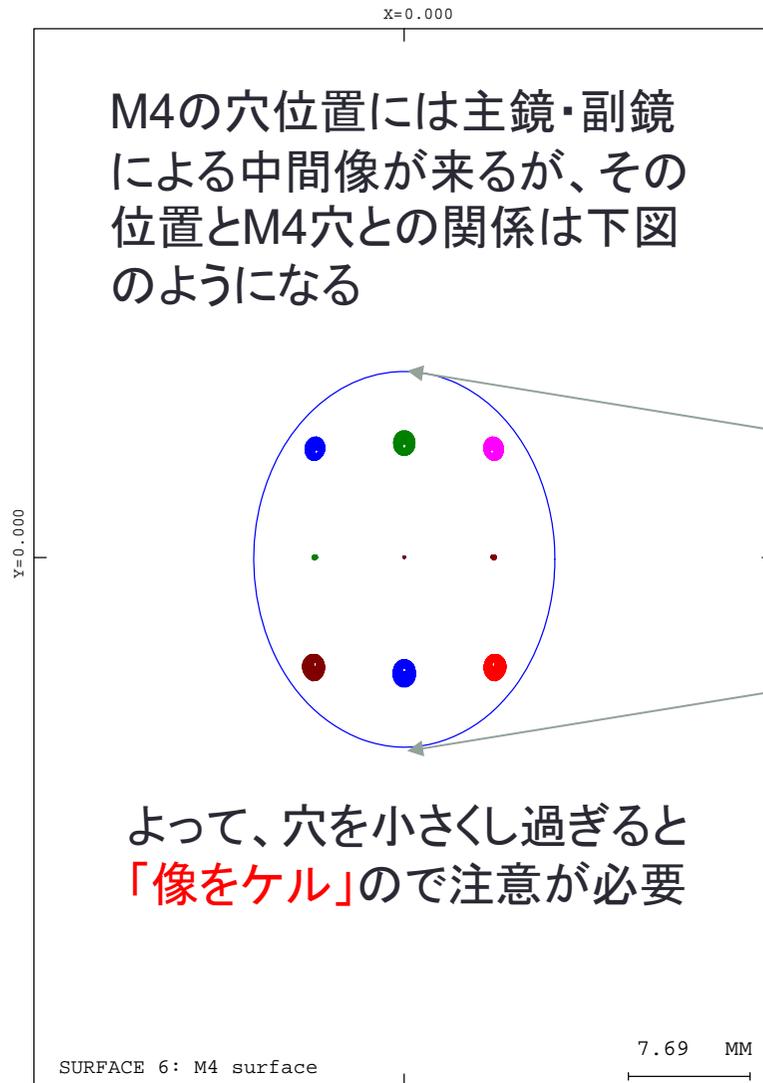


jas40x42: 波面収差と光線遮蔽

- 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



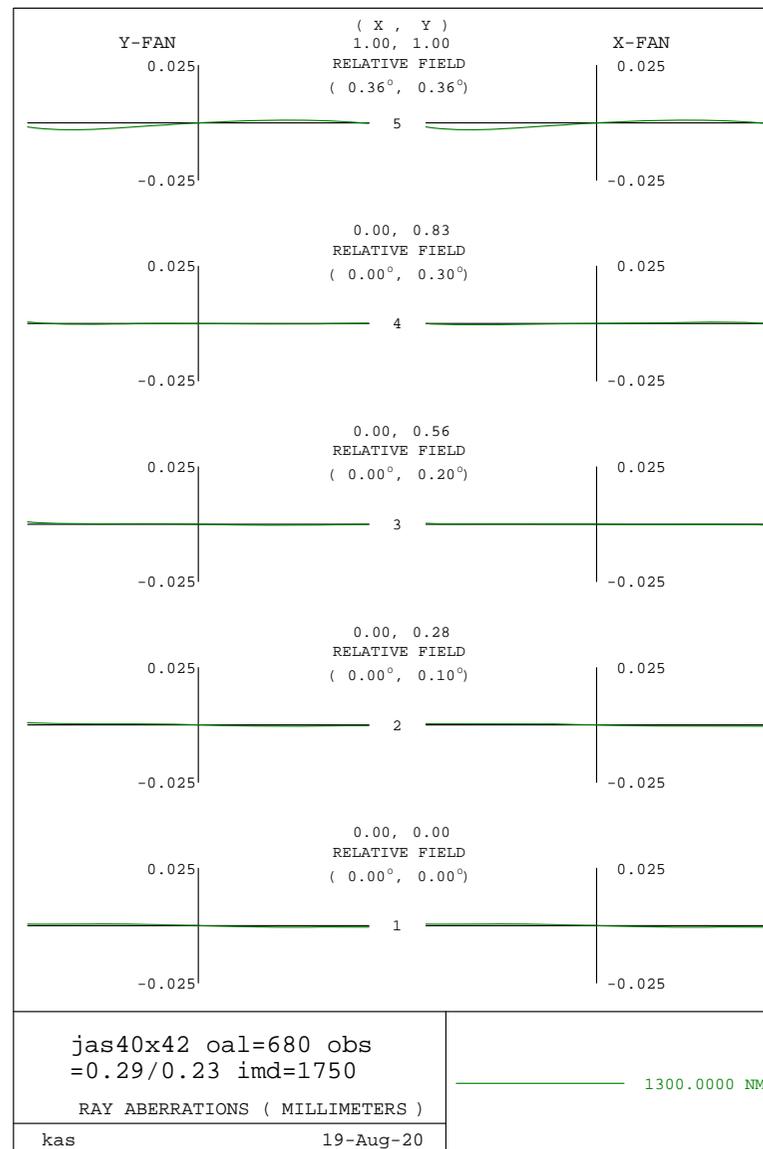
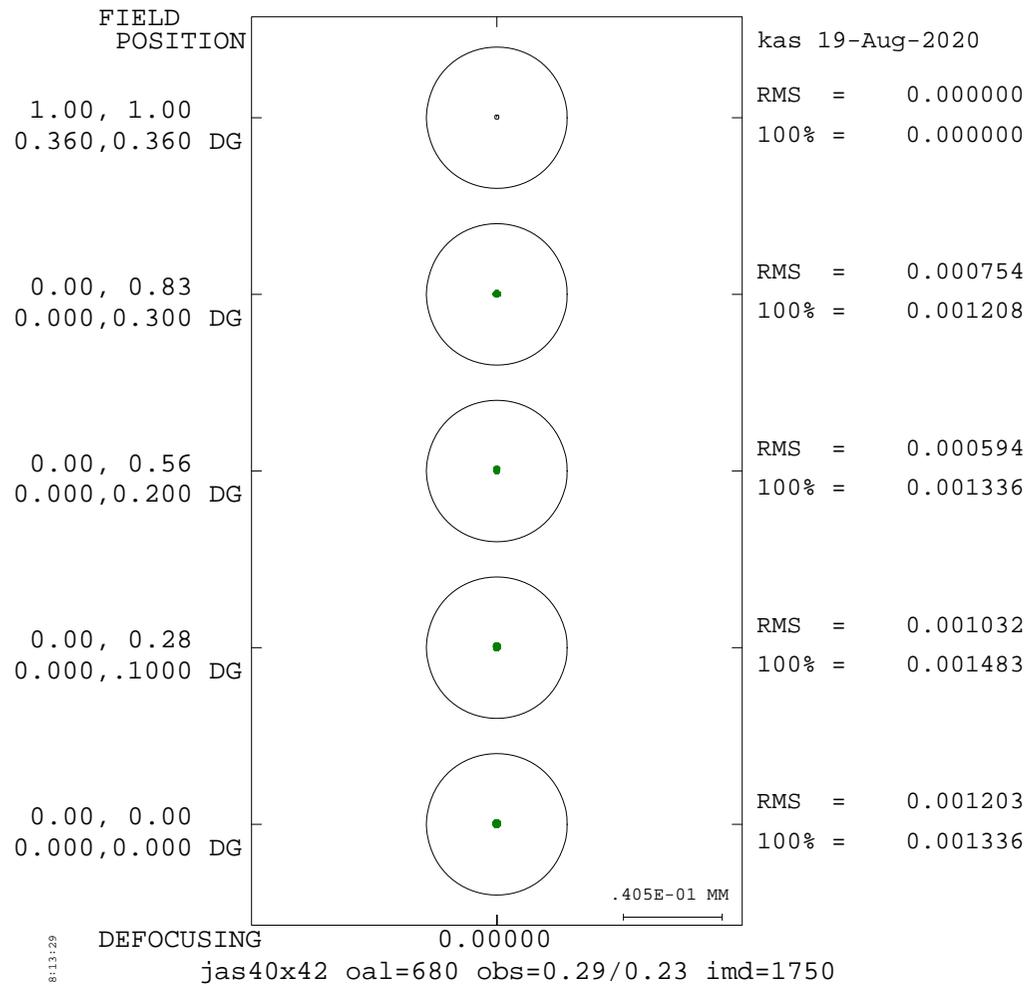
M4位置での中間像とM4上の光束



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

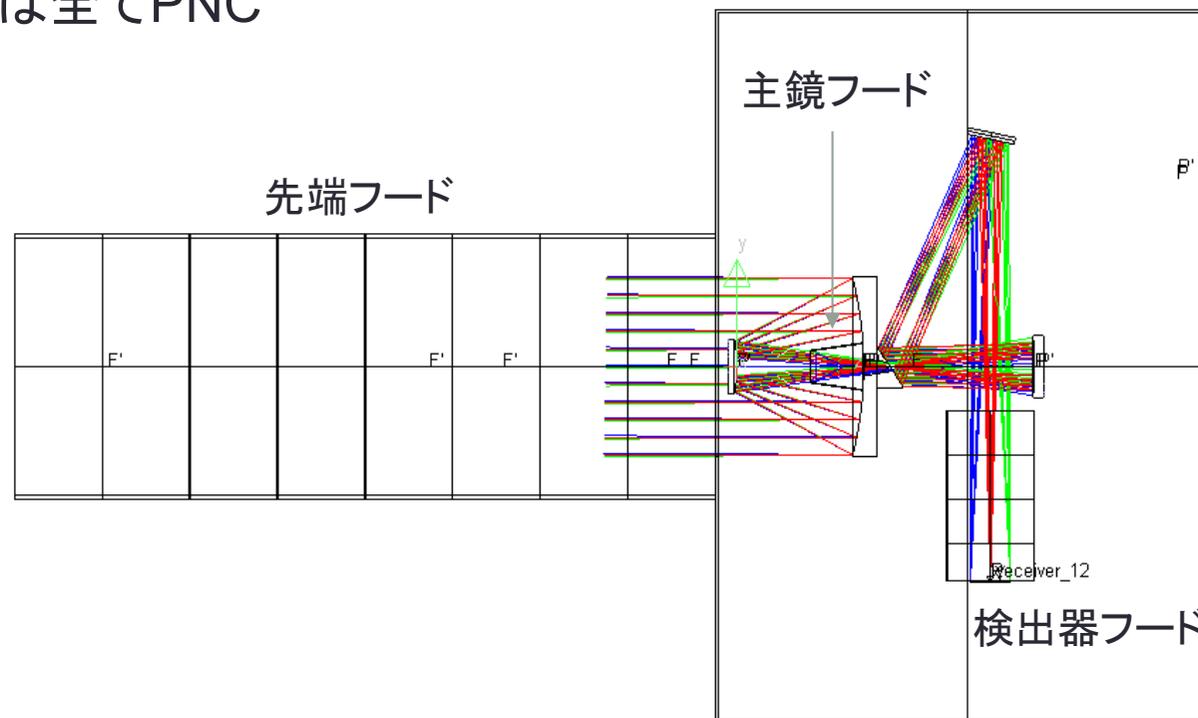
kas 21-Aug-20
jas40x42 oal=680 obs=0.29/0.23 imd=1750

jas40x42: 光線収差



迷光解析モデル

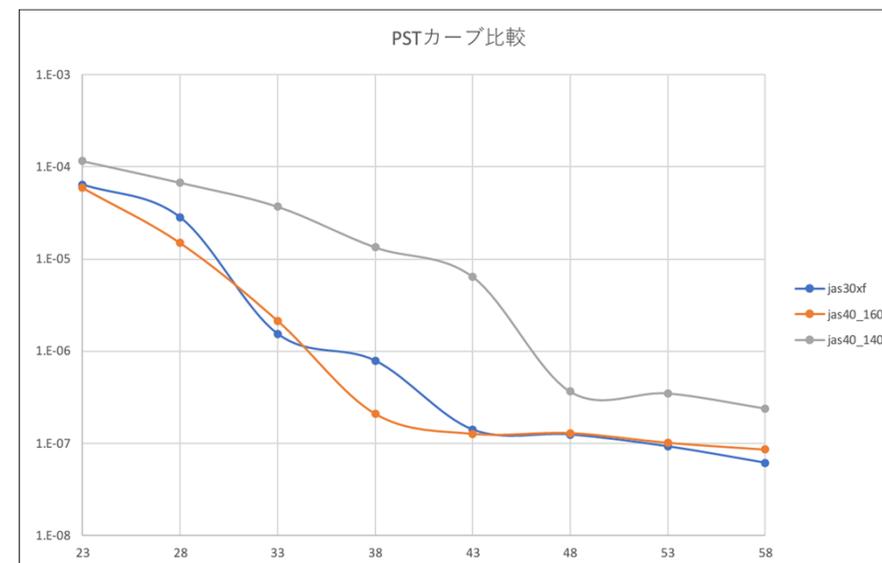
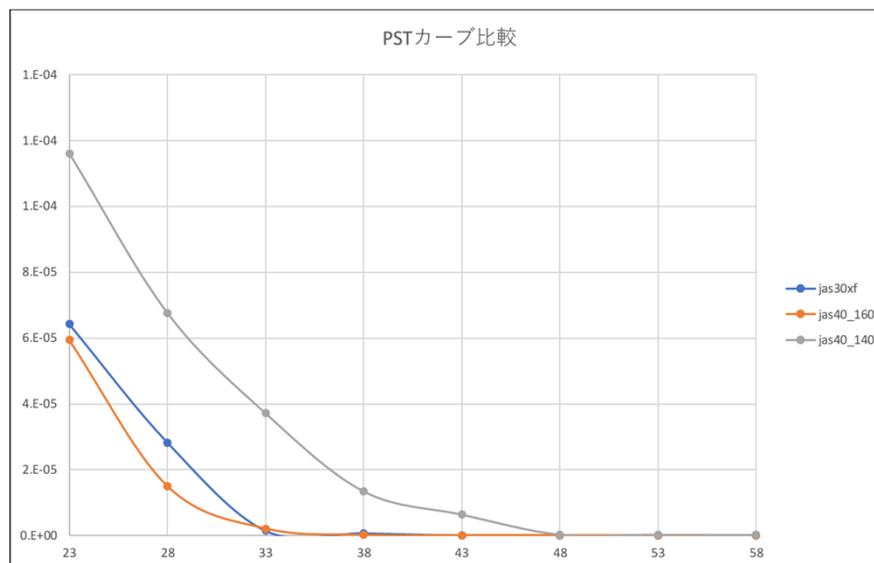
- BOXサイズは従来品を模擬したもので、仮置きである
- 先端フードの外径は60cm、長さ1.6m、バツフル間隔20cm
- 検出器フード外径は20cm、長さ38cm、バツフル間隔10cm
- 内面処理は全てPNC



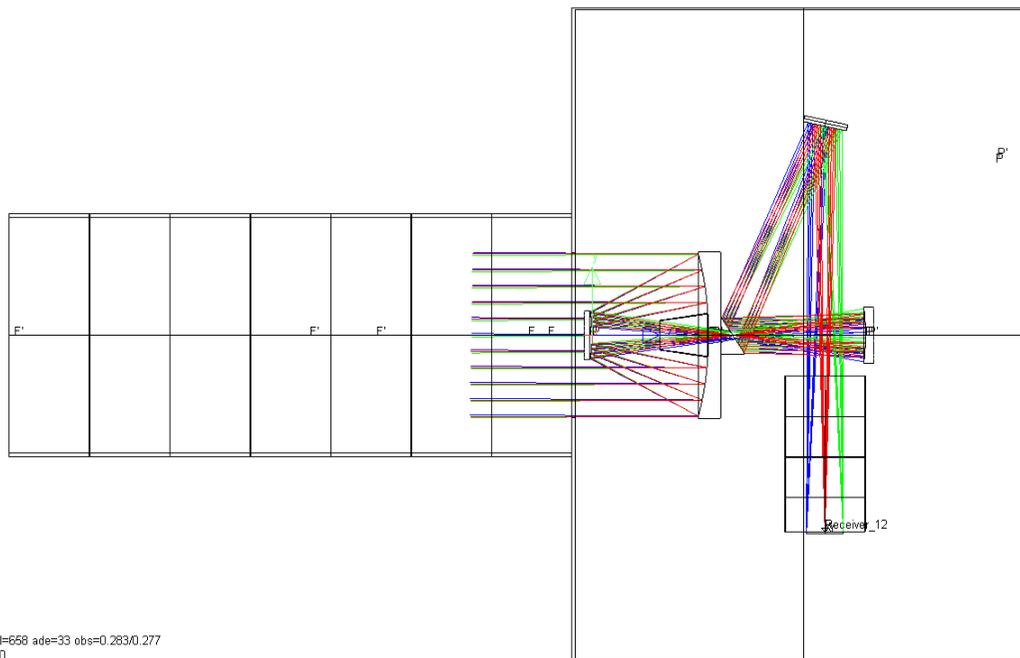
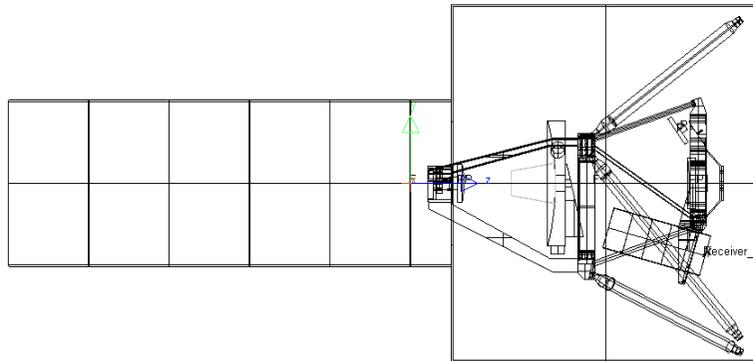
Box:1135x840x1605[mm]

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

参考: Vantablack特性

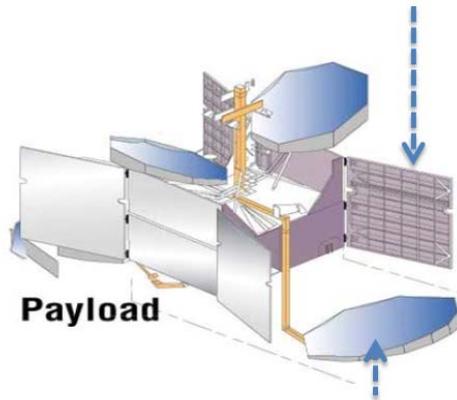
散乱特性の記載はないが、恐らくLambertに近いであろうし、
これだけ特性が良ければ、散乱特性はあまり影響しないかも知れない

TYPICAL PERFORMANCE DATA

Total Hemispherical Reflectance % Typical observed performance measured at AOI 8°	UV (220-400 nm) 0.6 % at 250nm VIS (400-750 nm) 0.3 % at 550nm and 0.2% at 700nm NIR (0.75-1.4µm) 0.2 % at 1400nm MWIR (3-8µm) 0.2 % at 5µm LWIR (8-15µm) 0.9 % at 14µm
Total Integrated Scatter % (white light) Typical values	AOI 10° 0.24 % AOI 30° 0.27 % AOI 50° 0.37 % AOI 70° 0.61 %
Coating thickness (average)	Typical 40µm (locally up to 100µm)
Operating temperature range in air	-196° to 300°C
Operating temperature range in vacuum or inert atmosphere	-196°C to 700°C
Thermal Shock	-196° to 300°C temperature swing over 5 minutes
Shock resistance	MIL STD 810 G Method 516.6
Vibration resistance	MIL STD 810 G Method 514.6
Humidity resistance	Hydrophobic
Mass / substrate area	0.7 mg/cm ²
Abrasion resistance	Low resistance to direct impact or abrasion

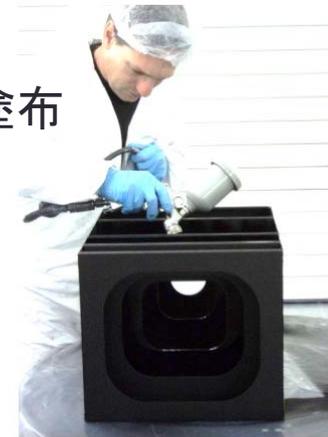
参考: Map社web siteのPNC特性

white thermal coatings
(SG121FD, SG122FD, PCBE, PSB, and PSBN)

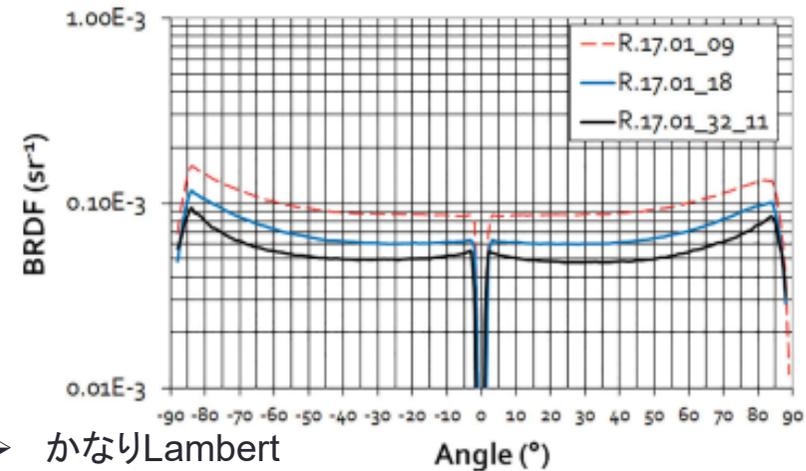
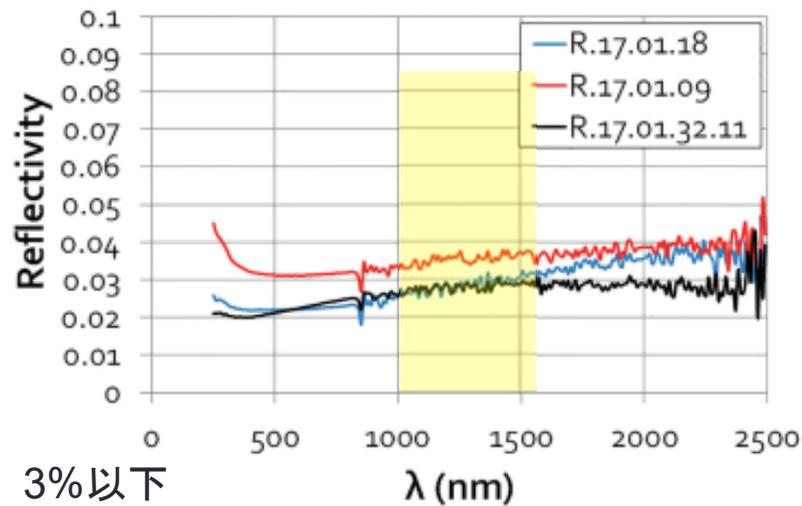


black thermal coatings
(PU1, PUK, PNC)

スプレーで塗布



Optical baffle - stellar diurnal sensor of the PILOT experiment (stratospheric balloon)
MAP® AQ PU1



- かなりLambert
- 但し、波長は532nm