

V252b

JASMINE望遠鏡光学系の開発 バンドパスフィルタの影響解析

国立天文台

JASMINE Project

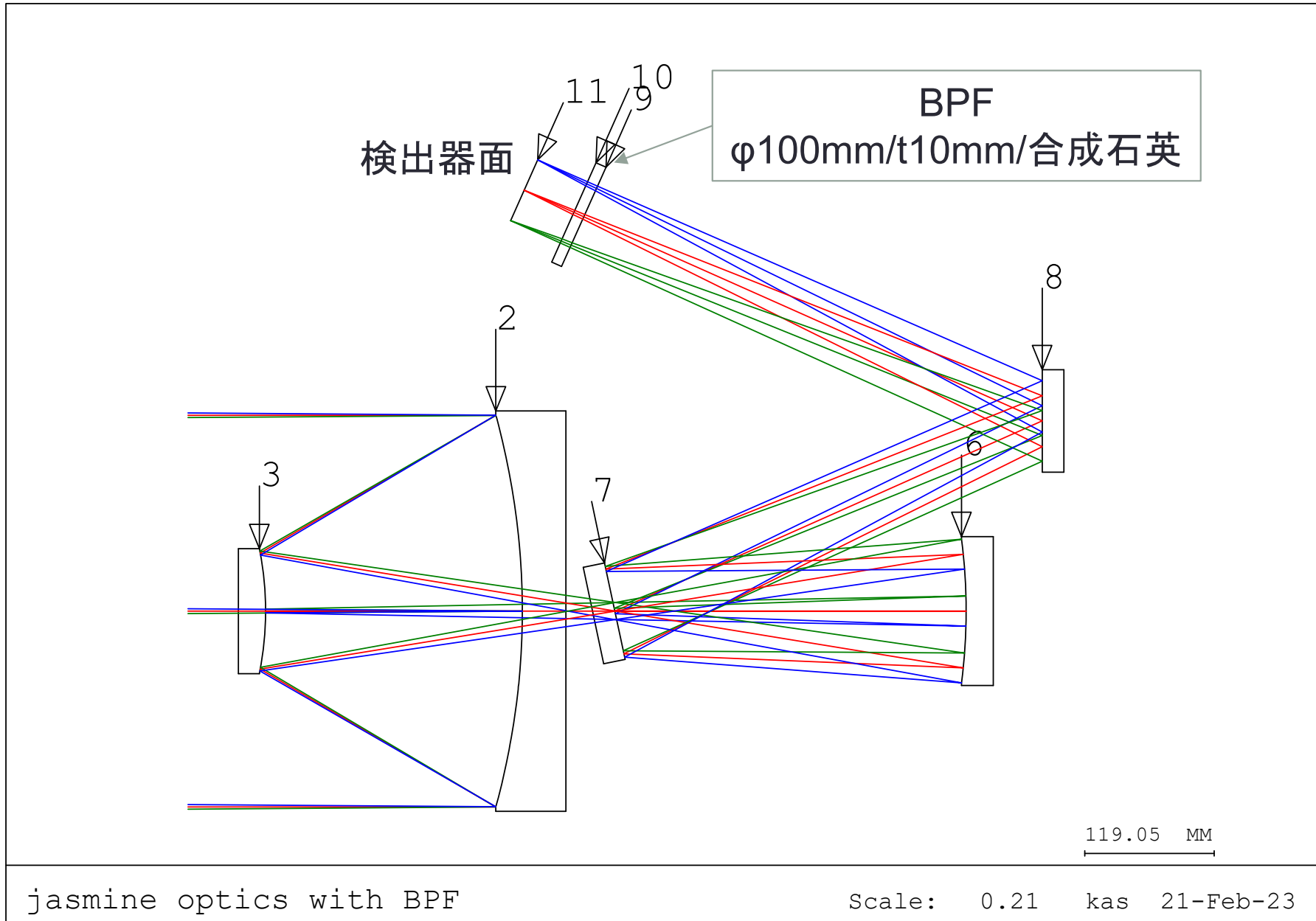
鹿島 伸悟

他 JASMINEチーム

背景

- JASMINEでは、観測波長帯域を $1.0\sim 1.6\mu\text{m}$ とするため、バンドパスフィルタ(BPF)が必要である
- 当初は、よくある透過型(屈折基板)のBPFを用いる予定であったが、最近のe2eの詳細な解析により、**BPF基板で生じる色収差(星のスペクトルに依存する星像位置シフト)**が**問題**となることが分かった
- 一般的な色収差としては全く問題にならないレベルであり、波長 $1.3\mu\text{m}$ 単色での波面収差ストレーラ比(SR)に対して、波長 $1.6\mu\text{m}:1.3\mu\text{m}:1.0\mu\text{m}$ を $1:1:1$ のウェイト付けで計算した**SRが0.002劣化するだけ**である(最軸外で $0.992\Rightarrow 0.990$)
- 単色収差の場合、製造誤差等でSRが0.9程度に劣化しても、必ずしもPSFのセントロイド(星像位置)がずれる訳ではなく、通常SRが0.9以上もあれば、PSFはほぼ真円であるため、セントロイドはほぼずれない
- 一方、色収差があると、いかに性能が良く、例えSRが0.99以上であっても、原理的に星像位置がずれる
- そのため、**単色収差とは桁違いの悪影響を及ぼす**のである

光学系Layout



対策方法と問題点

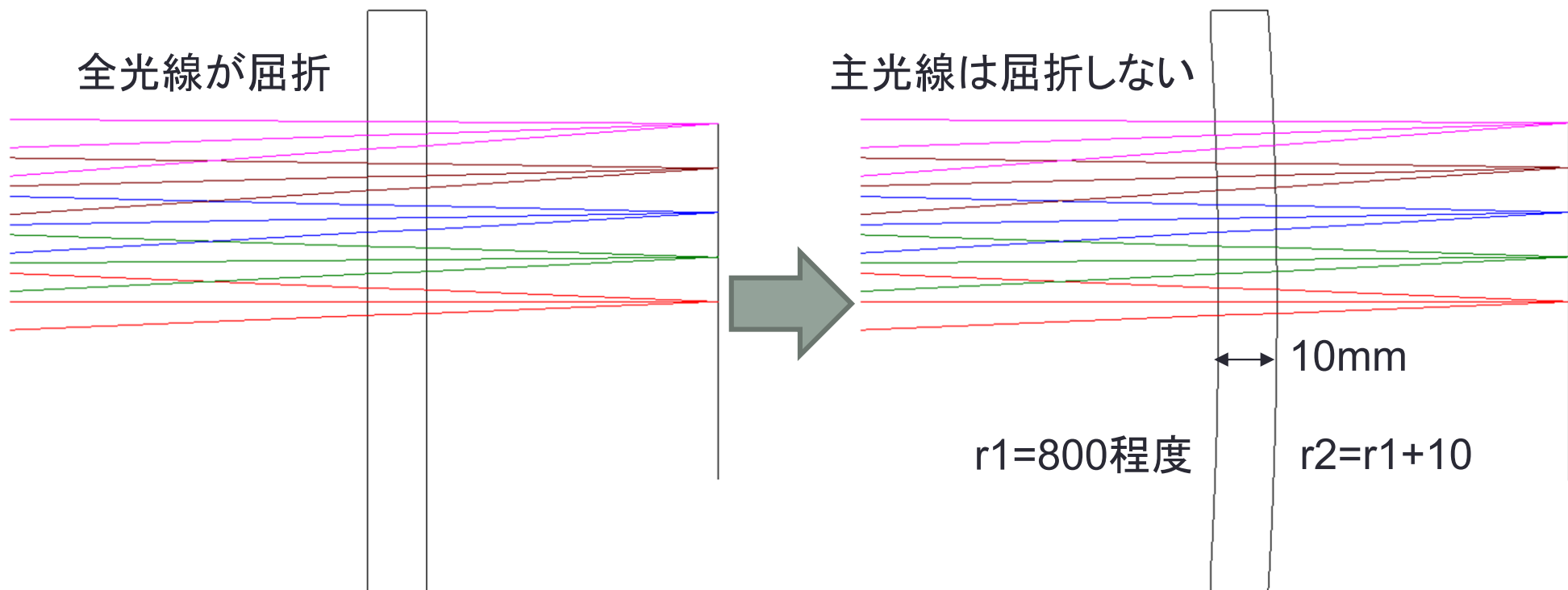
- ① 解析で補正する
 - 対象の星のスペクトルデータが分かっている必要があり、かなり困難
- ② BPFを極力薄くする
 - 打上げ時の衝撃で割れる可能性があり、また波長ズレ低減効果が小さい
- ③ BPFを極力検出器面に近づける
 - 構造・熱的に限界があり、またBPF上のキズやコンタミがダイレクトに像に悪影響を及ぼす
- ④ 反射型のBPF(DM:ダイクロイックミラー)にする
 - 透過型に比べて分光特性が出しにくく、また通常DMは短波長反射/長波長透過であるが、今回は逆特性になるため、なおさら**分光特性が出しにくい**
- ⑤ 光学系を像側テレセンにする(主光線を垂直入射させる)
 - **ミラー3枚では不可能**、最低でもあと1枚は必要でコストも上がる
- ⑥ BPFを、射出瞳位置までの距離のRを付けたメニスカス形状にする
 - 設計値では非常に効果があるが、BPFの形状誤差や設置誤差が厳しくなる

④反射型BPF

- 前述の内、実現可能性があるのは、④と⑥とし、詳細な検討を行った
- BPFの分光特性に関しては、成膜メーカーに設計を依頼したため、そのシミュレーションデータをそのまま出す訳には行かない
- そのため、分かり難いが数値で下記する
- 透過型BPF特性
 - 透過率: 90%以上@1.0-1.6 μ m
 - 反射率: 0.1%以下@0.4-0.8 μ m
 - 反射率: 50 \pm 5%@0.9 μ m
- 透過型BPF特性
 - 透過率: 90%以上@1.0-1.6 μ m
 - 反射率: **平均2.5%程度@0.4-0.8 μ m**
 - 反射率: 50 \pm 5%@0.9 μ m
- 赤字で示した**可視光の漏れ込みが最も問題**であり、これほど可視光が漏れ込むと、検出器がシンチレーターのようになってしまい、肝心の近赤外光が検出できなくなるため**反射型BPFに関しては断念**

⑥メニスカスBPF

- BPFに光線が斜入射するからその界面で屈折し、色収差が発生するのであり、**垂直入射させれば屈折しないため、色収差も発生しない**
- 光学系を像側テレセンにするのも同じ理屈である
- 但し、**垂直入射させられるのはあくまでも主光線のみ**であり、その周りの従属光線は屈折するため、多少の波長シフトは生じる
- r_1 の曲率半径は、 r_1 から射出瞳までの距離に等しくし、 r_2 の曲率半径は r_1+10 (BPFの厚さ)とすれば、主光線は屈折せず直進する



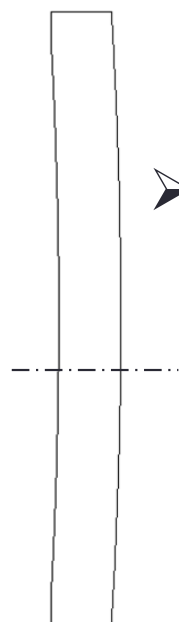
メニスカスBPFの誤差要因

屈折部材は反射部材に比べて誤差要因が非常に多い！

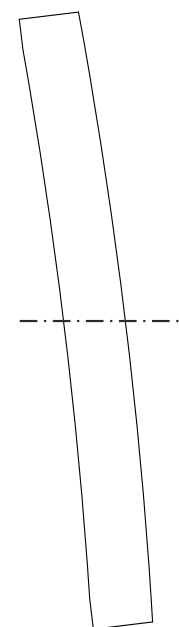


- 基板のr1が製造でずれる
- 基板のr2も製造でずれる
- 厚さがずれる
- r1がr2に対して傾く
- 基板の屈折率が不均一になる(脈理や温度変化)
- r1,r2共に成膜で歪む
- 設置する位置が光軸方向にずれる

黒字はミラーにもある誤差要因



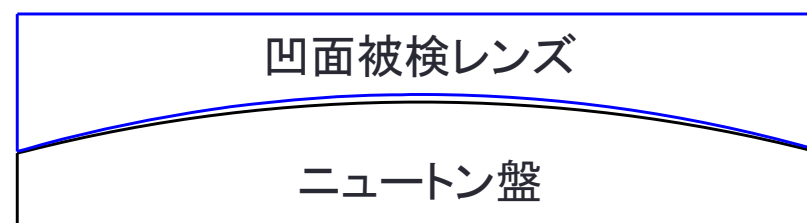
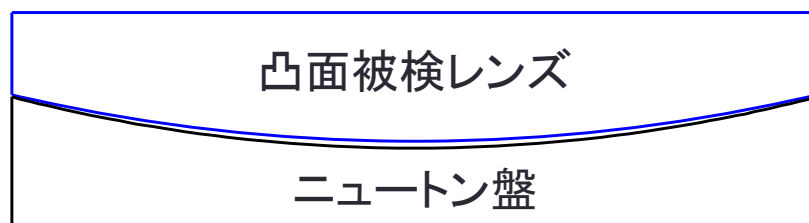
➤ 設置時横にずれる



➤ 設置時傾く

基板形状R面誤差(NR)

- 平面や通常の球面レンズを作る場合は、レガシーな製造方法になることが多く、設計の曲率半径を持つニュートン盤を当てて、ニュートンリング(NR)の本数で精度を見ることが多い
- その場合、レンズがニュートン盤に当たるとキズが付く恐れがあるため、いわゆる「縁当て」の状態、指定の公差に入ったら加工を止めることが一般的である(下図)
- そのため、凸面は緩く(曲率半径が大きく)なり、凹面はきつく(曲率半径が小さく)なる
- 今回のBPFはメニスカスであるため、片面が凸面、もう片面が凹面であり、設計では両Rの差を厚さである10mmとしていたものが、それぞれ逆方向に曲率半径がずれるため、色収差に関しては悪い方向となる(両面とも同じ方向に同じ量ずれる場合は影響が小さい)



膜応力によるR面の変形

- Stoney(-Hoffman)の式より、膜応力によるR面の変形は大凡見積もることが出来る
- それに従えば、変形量は基板の厚さの2乗に反比例し、外径の2乗と膜厚に比例する(基板の相似拡大では変形量は同じ)
- 但し、成膜方式や装置が異なると一致度が低いため、それらをパラメータとしてサンプル作製によりパラメタフィッティングを行うことで、かなり一致度を向上させることができる(ref: 膜応力による基板の反りの定量的計算について/表面技術2020年71巻10号P.601-606)
- 下図は、上記論文から引用したものであり、たまたまであるが、成膜物質が Ta_2O_5/SiO_2 とJASMINEのBPFと同じである
- これらの変形量から、JASMINEのBPFを厚さ10mm/ ϕ 100mm/総膜厚20 μ mとすると、変形量は約3.5 λ 、つまり約NR7本程度と見積もられる

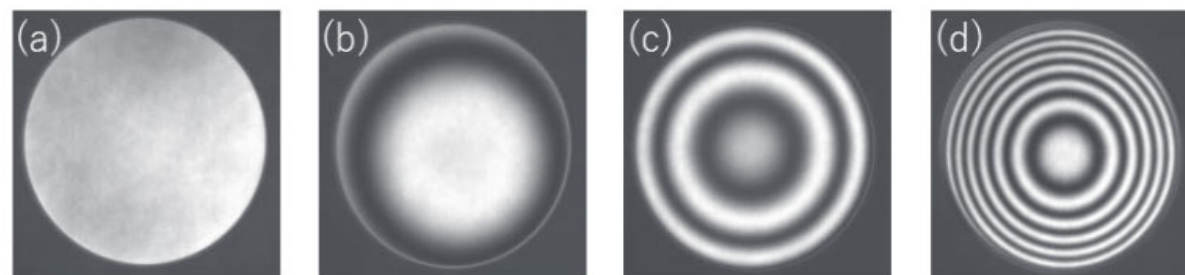
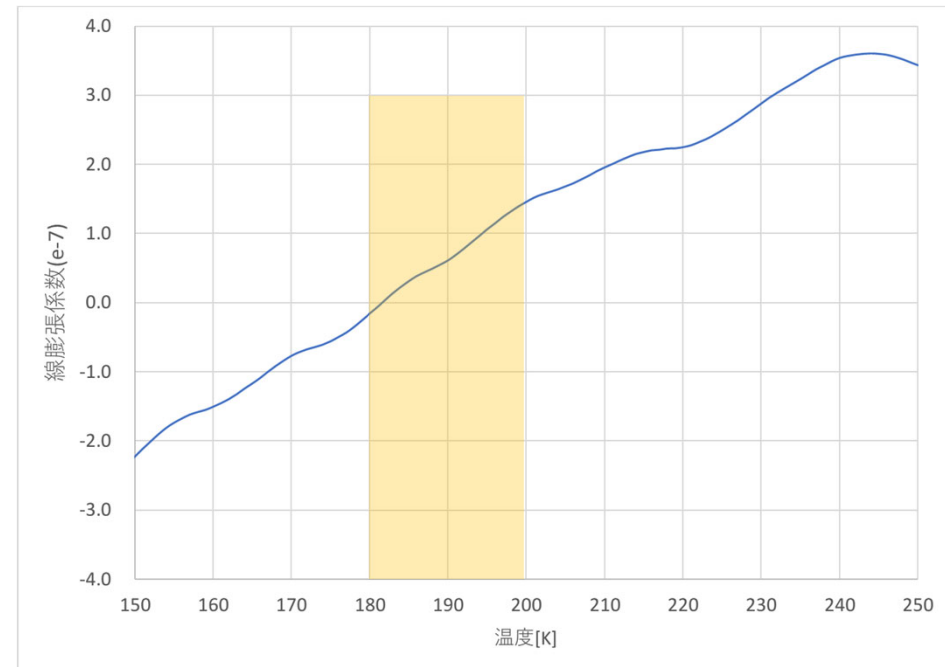


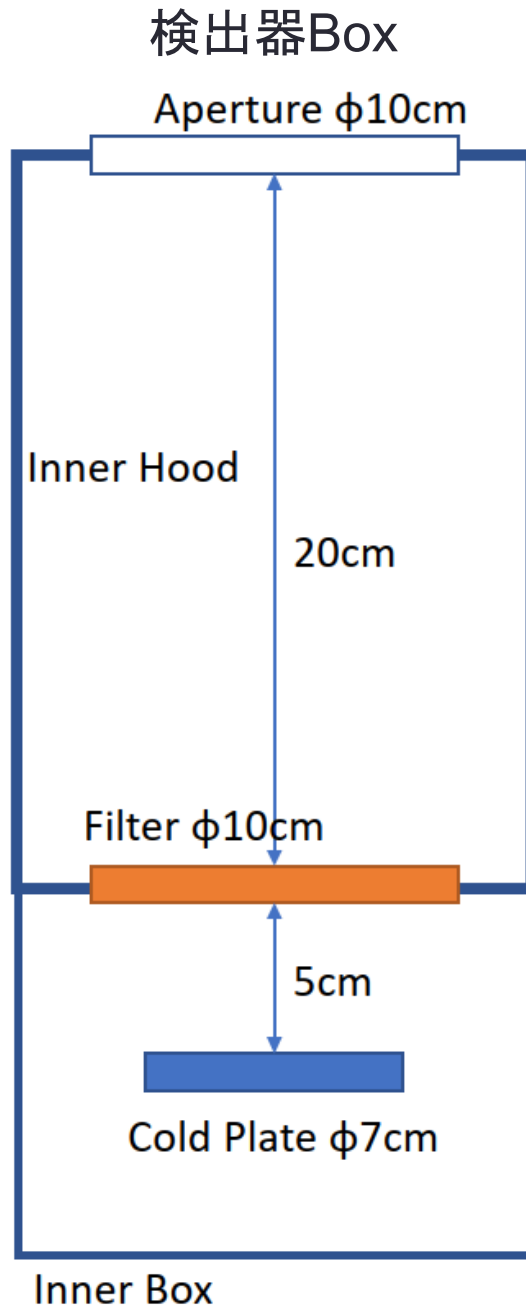
図1 イオンビームスパッタリングで Ta_2O_5/SiO_2 多層膜(32層, 総膜厚5.8 μ m)を成膜したときの干渉縞¹⁷⁾
(a)は成膜前, (b), (c), (d)はそれぞれ板厚が8 mm, 5 mm, 3 mmの合成石英基板へ成膜した後のもの

温度分布による屈折率変化

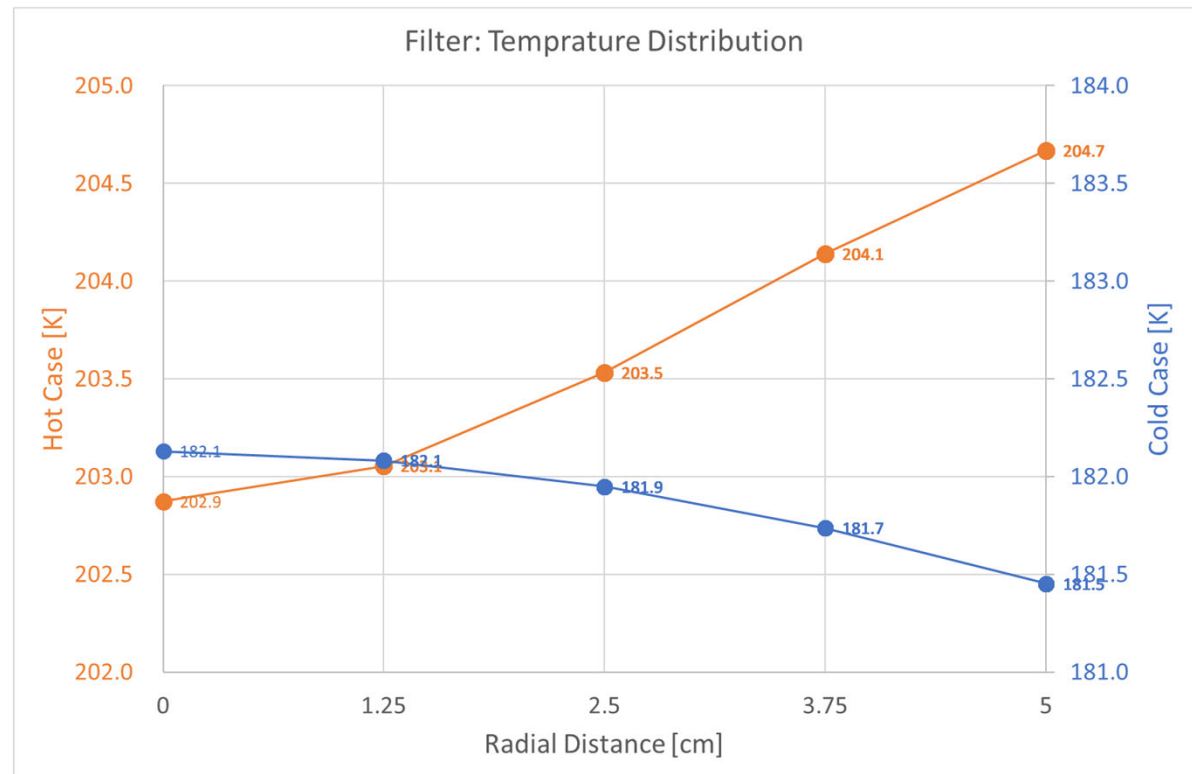
- 屈折部材で特に問題となるのが、内部屈折率の非一様性である
- 製造的には、いわゆる脈理(不規則なもの)が入ったり、規則的な分布が生じたりする
- また、特に衛星望遠鏡の場合は、**観測中に環境温度分布が変わり、それに伴って屈折率が変化して悪影響を及ぼす**
- BPFの温度分布に関して、熱設計部署よりデータが示されたため、それを屈折率分布に置き換え、光学的な影響を解析した
- 他方、JASMINEのBPF位置の温度は、180~200K程度(右図オレンジ部分)であるが、合成石英は182K当たりでCTEがゼロになるため、上記温度範囲でもCTEは非常に小さいことにより、**形状の変化は小さく、問題にならない**



BPFの温度分布



- 検出器Boxの模式図を左記する
- Cold Plateの所に検出器面がある
- JASMINEは季節変動に伴うラジエーターの向きによって、最もhotな時(case1)と最もcoldな時(case2)で、BPFの基準温度に約20Kの差がある
- それぞれのケースでのBPFの温度分布を下記する



合成石英の物性値

- 実際にBPFの基板に用いる合成石英は、おそらく信越石英製のものになるが、近赤外で低温の物性値は公表されていないため、NASAが **Corning 7980**(よく使われる合成石英であるが無水ではない)に関して測定した論文の数値を用いた(ref: Temperature-dependent absolute refractive index measurements of synthetic fused silica, NASA Goddard Space Flight Center, 2008)
- 上記論文を信越石英に送ってチェックしてもらったところ、物性値は大同小異とのことであった
- **下表の値は全て200Kでのもの**である
- 論文では、200Kの下は160Kとなっており、180Kの値はない
- dn/dT の値は低温ほど小さくなり、より悪くなる方向であるため、case2でも下記の値を用いた
- また、屈折率の変動が問題であり、初期値はほとんど影響しない

| WL[nm] | 1600 | 1500 | 1200 | 1000 |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| n | 1.44314 | 1.44433 | 1.44776 | 1.45012 |
| dn/dT | 6.14E-06 | 6.18E-06 | 6.19E-06 | 6.24E-06 |

屈折率分布型材質

- CodeVには、ユーザが、屈折率を任意の関数として指定することができる機能があるが、よく使うタイプの屈折率分布(GRIN=GRadient INdex)のいくつかは予め用意されている
- 今回はその中で、**ロチェスター大学形式GRIN**を用いたが、これは以下の式で表される

ロチェスター大学形式 GRIN に関して必要な知識

$$n(r,z) = n_{00} + n_{01} z + n_{02} z^2 + n_{03} z^3 + n_{04} z^4$$

$$+ n_{10} r^2 + n_{20} r^4 + n_{30} r^6 + n_{40} r^8$$

ここで

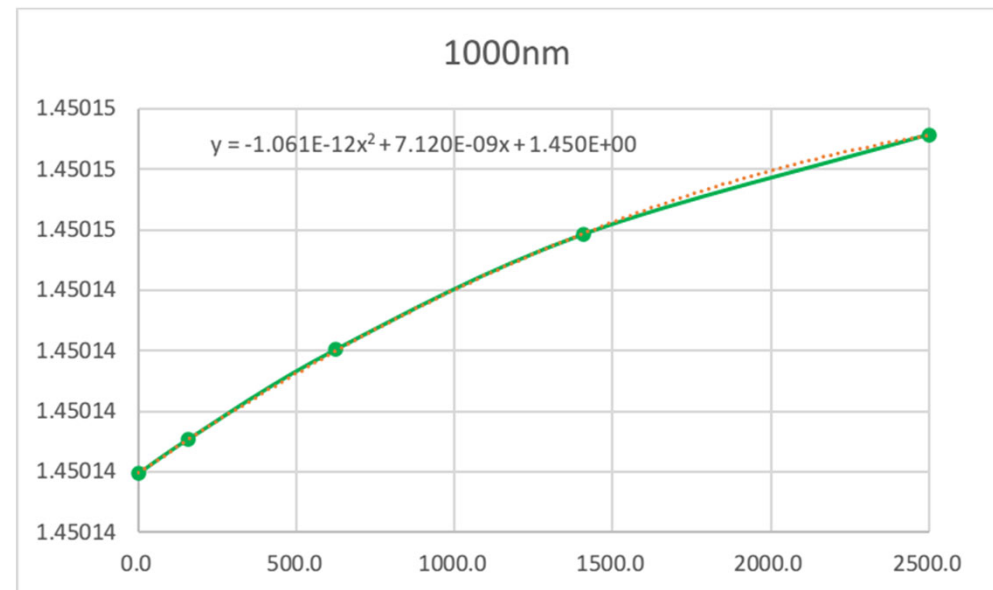
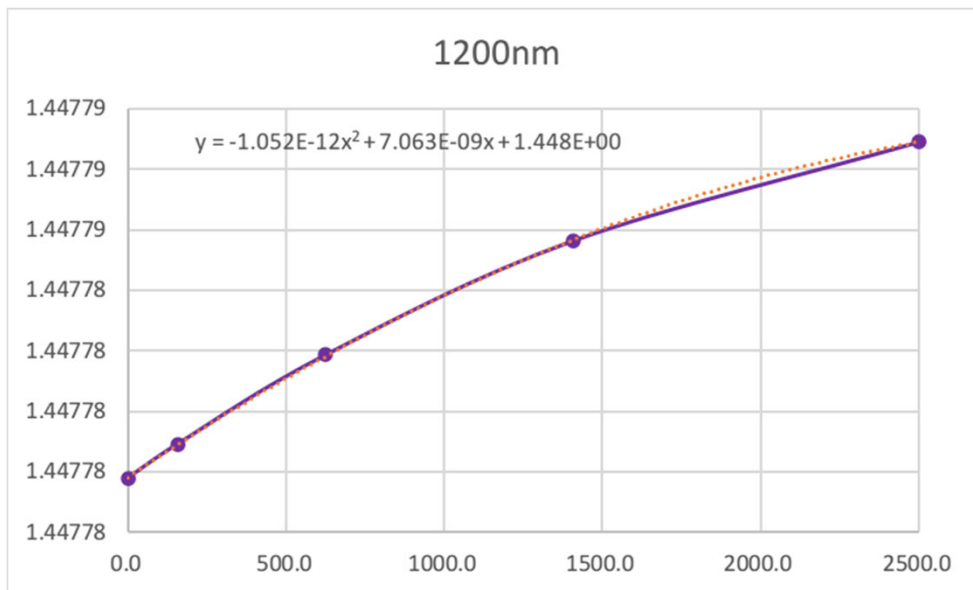
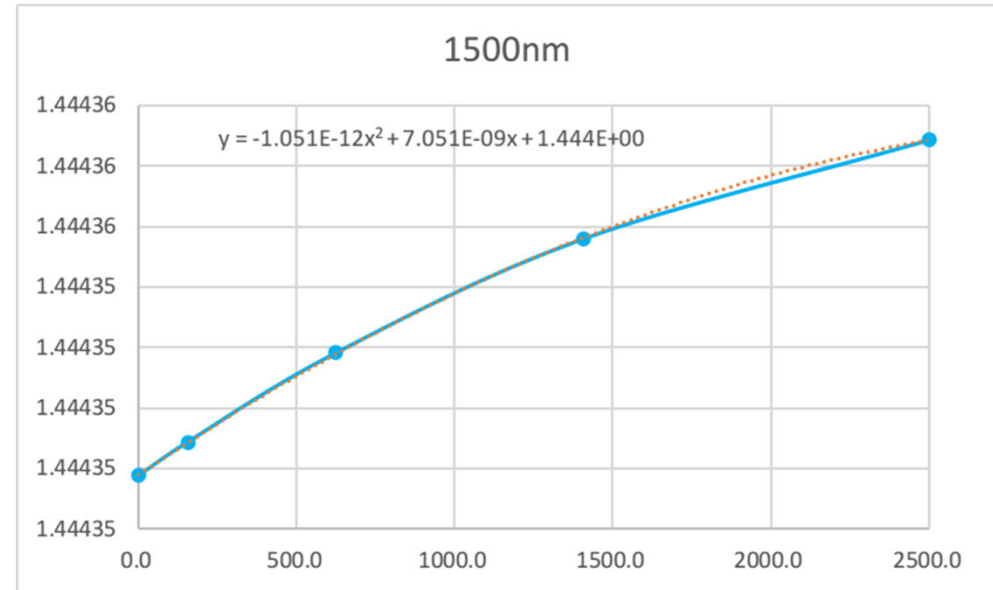
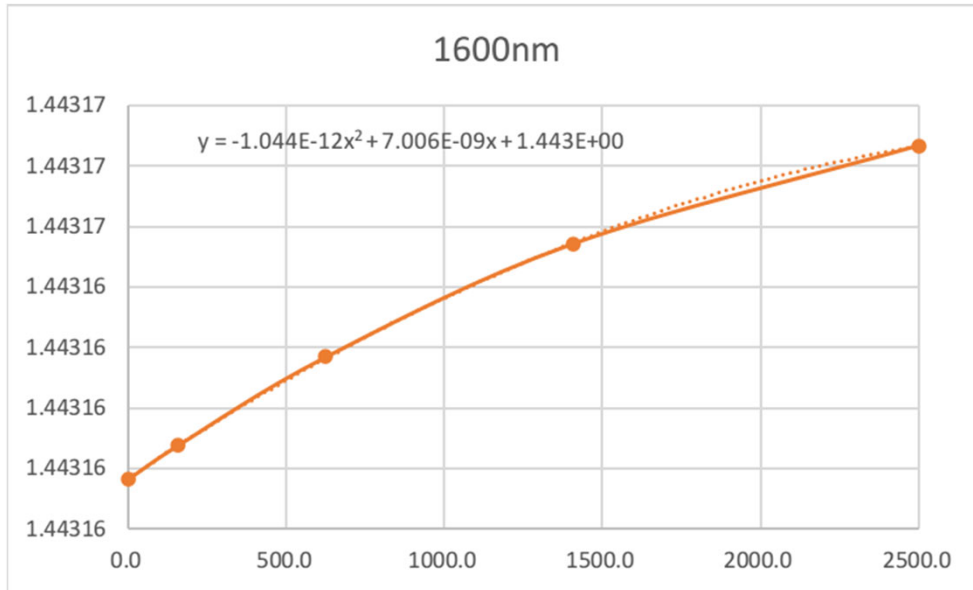
| | |
|------------------|-------|
| n | 屈折率 |
| n_{00} | 基準屈折率 |
| n_{0i}, n_{j0} | 係数 |

$$r^2 = x^2 + y^2$$

- 式を見れば一目瞭然であるが、**光軸方向(z)と半径方向(r)に対して各々4次多項式**で屈折率を与えるものである
- 但し、回転対称を仮定しているため、rではなく、 r^2 に対する4次式となっている
- 光軸方向の温度分布は半径方向に比べて単純であり、caseによらず、**厚さ10mm中に約0.3Kの線形**となり、当然検出器側が低温となる

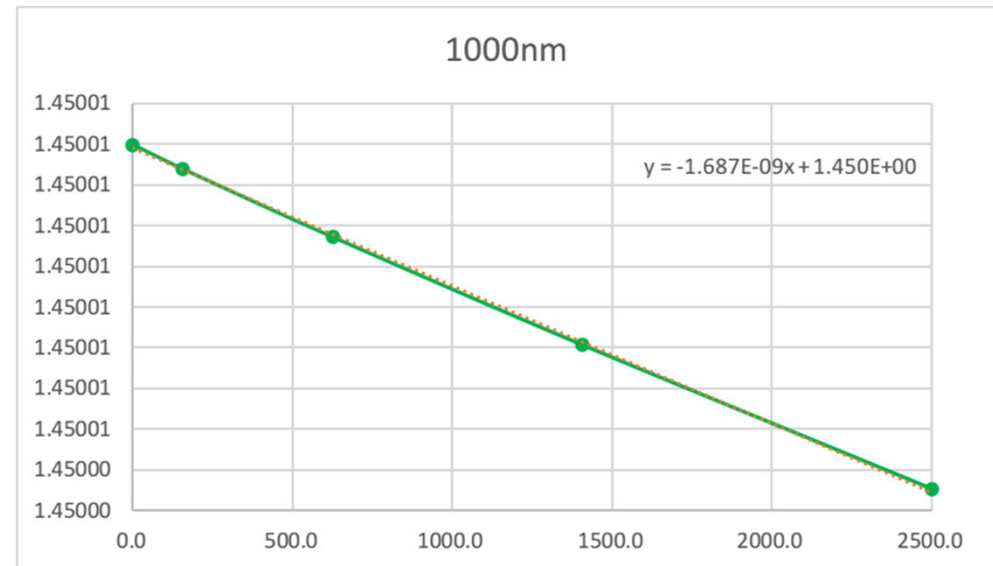
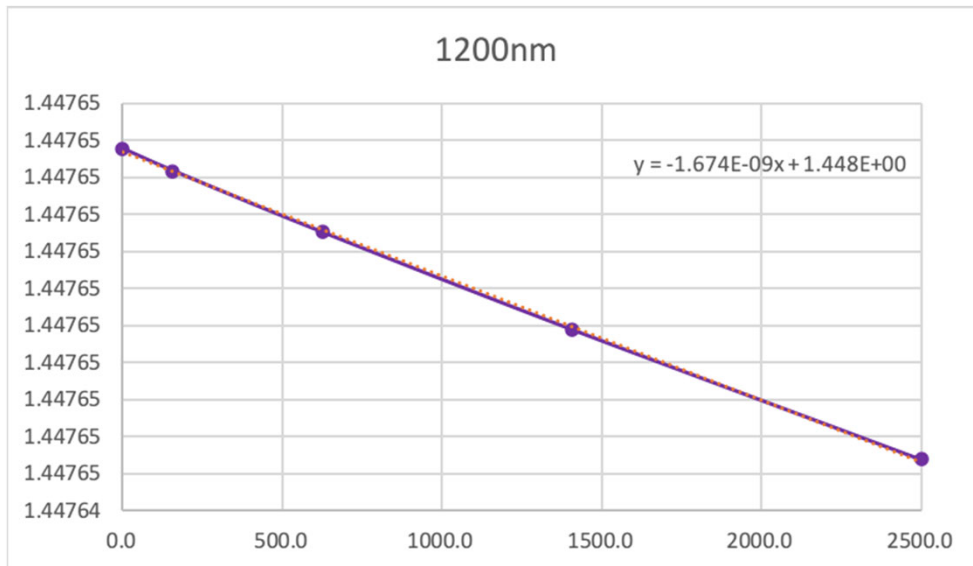
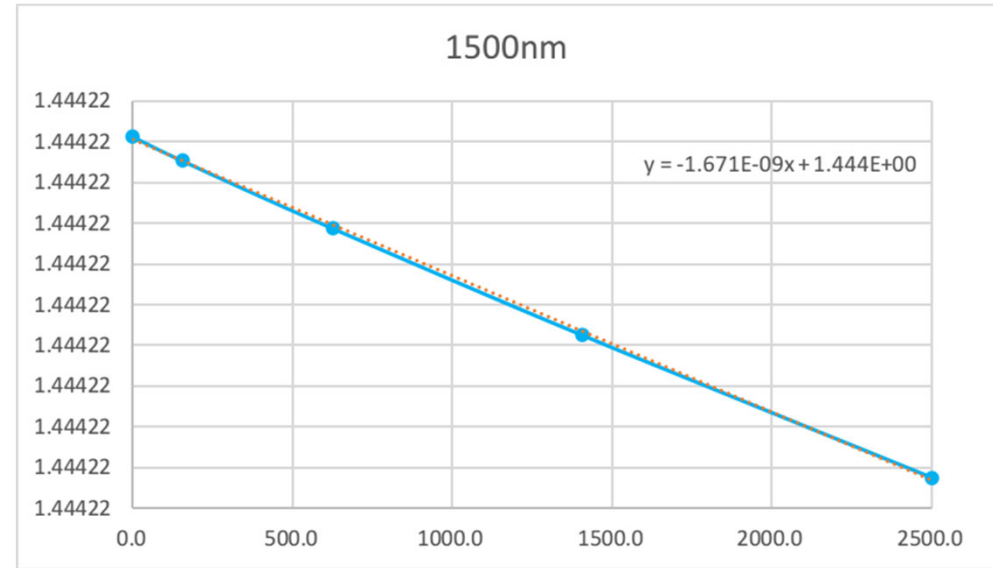
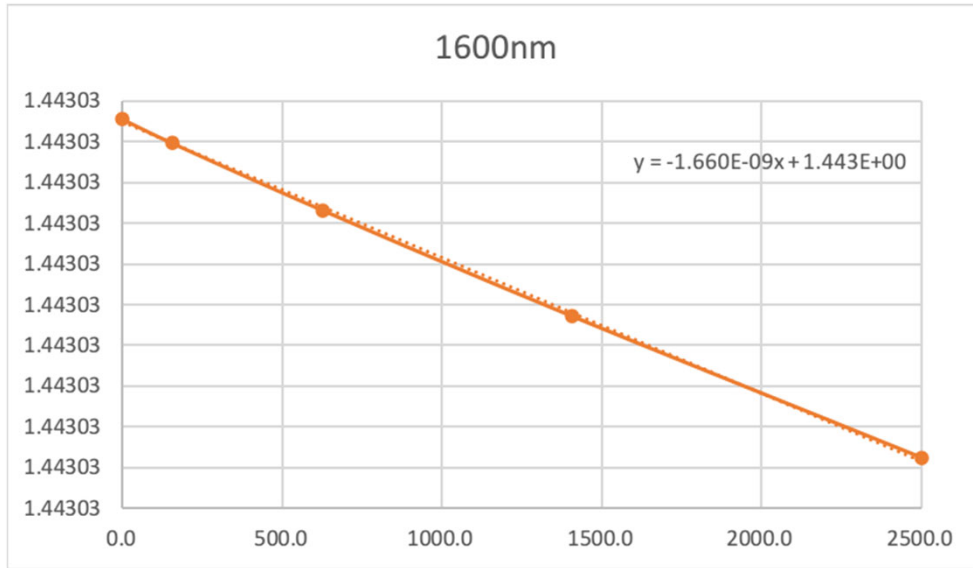
半径方向屈折率分布: case1

2次関数で近似し、その係数を用いる



半径方向屈折率分布: case2

1次関数で近似し、その係数を用いる



BPF誤差まとめ

- 製造性も鑑み、設定(推定)した各誤差と、その際の波長シフトを下表に示す
 - ① 面形状誤差(NR): NR10/4
 - ② 偏心誤差: 厚さ0.5mm/面偏心5"/位置3mm/シフト0.2mm/ティルト1'
 - ③ 温度分布: axis, case2
- 許容値は、画角0.3degで0.05 μ m以下であり、これは「単色収差SR0.9でのPSFセントロイドずれと同程度」という基準で導かれたものである
- 下表右端がRSSであるが、画角0.3degでの値は0.044となっており、上記許容値を下回っていることが分かる

| Chief ray[um] | 膜応力nr+7 | thickness | s_tilt | position | shift | tilt | thermal | | |
|------------------|-----------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| yan | nr10/4 | thi s9 10.5 | ade s10 5" | thi s8 3 | yde 0.2 | ade 1' | axis | case2 | RSS |
| 0 | -3.15E-16 | -3.66E-16 | 8.46E-03 | -3.46E-16 | -8.65E-03 | -1.03E-02 | -3.39E-16 | -3.43E-16 | 0.016 |
| 0.1 | -4.94E-03 | 1.48E-03 | 8.12E-03 | 7.85E-04 | -9.00E-03 | -1.06E-02 | -3.61E-04 | 4.80E-04 | 0.017 |
| 0.2 | -9.89E-03 | 2.98E-03 | 7.80E-03 | 1.59E-03 | -9.33E-03 | -1.10E-02 | -7.06E-04 | 9.30E-04 | 0.019 |
| 0.3 | -1.48E-02 | 4.53E-03 | 7.53E-03 | 2.42E-03 | -9.64E-03 | -1.13E-02 | -1.02E-03 | 1.32E-03 | 0.023 |
| 0.4 | -1.98E-02 | 6.15E-03 | 7.32E-03 | 3.30E-03 | -9.89E-03 | -1.15E-02 | -1.29E-03 | 1.62E-03 | 0.027 |
| PSF centroid[um] | | | | | | | | | 0.000 |
| 0 | -1.82E-11 | -2.97E-11 | 1.69E-02 | 2.46E-12 | -1.73E-02 | -2.06E-02 | 1.14E-10 | -5.28E-12 | 0.032 |
| 0.1 | -1.01E-02 | 2.78E-03 | 1.61E-02 | 1.41E-03 | -1.82E-02 | -2.14E-02 | -8.85E-04 | 7.97E-04 | 0.034 |
| 0.2 | -2.07E-02 | 4.99E-03 | 1.47E-02 | 2.24E-03 | -1.96E-02 | -2.29E-02 | -2.34E-03 | 9.37E-04 | 0.040 |
| 0.3 | -2.77E-02 | 1.11E-02 | 1.70E-02 | 6.83E-03 | -1.73E-02 | -2.06E-02 | -8.21E-05 | 4.59E-03 | 0.044 |
| 0.4 | -3.60E-02 | 1.61E-02 | 1.83E-02 | 1.03E-02 | -1.62E-02 | -1.95E-02 | 1.03E-03 | 6.83E-03 | 0.052 |
| ratio(psf/chief) | | | | | | | | | |
| 0.2 | 2.1 | 1.7 | 1.9 | 1.4 | 2.1 | 2.1 | 3.3 | 1.0 | 2.0 |
| 0.3 | 1.9 | 2.5 | 2.3 | 2.8 | 1.8 | 1.8 | 0.1 | 3.5 | 1.9 |
| 0.4 | 1.8 | 2.6 | 2.5 | 3.1 | 1.6 | 1.7 | -0.8 | 4.2 | 1.9 |

まとめと今後の予定

- 通常の平行平板に成膜したBPFでは、許容値を2桁上回る「星のスペクトルに依存する星像シフト」を、メニスカス形状にすることで、許容値を下回るBPFを実現出来る目処が立った
- 作ってみなければ正確には分からない「膜応力による変形」に関しては、表裏面が同じだけ変形するため、影響が小さく、あまり問題とならないことが分かったのは僥倖である(但し、試作は必要)
- たとえNR20本分(ΔR =約3.6mm)ずれても、星像シフト量は $0.008\mu\text{m}$ (許容値 $0.05\mu\text{m}$ の1桁下)程度に収まる
- 極論すれば、基板さえ高精度に作れば、成膜の影響は心配無用ということである
- 設置誤差も、シフト 0.2mm /ティルト1minとそこそこ厳しいが、メカ精度でも実現出来るレベルであろう(調整は、何を見て行うかが問題)
- 懸案であった、観測中の温度変化に伴う屈折率変化による影響も思ったより小さく、ほぼ問題にならないレベルであった(石英は通常のガラスに比べてCTEは小さいが dn/dT は桁で大きい)