

Lite (Light) Satellite for the Studies of B-mode Polarization and
Inflation from Cosmic Background Radiation Detection

V122b LiteBIRD クロストラゴン光学系設計 非球面次数と性能

○鹿島伸悟, 関本裕太郎(NAOJ)
松村知岳(JAXA), 菅井肇(東京大学)
木村公洋(大阪府立大学), 羽澄昌史(KEK)
他LiteBIRD WGメンバー

CMB観測衛星 LiteBIRD

- LiteBIRDの科学目的は、ビッグバン以前の宇宙の姿、つまり宇宙の始まり直後の指数関数的膨張時代(インフレーション期)の存在を検証することである
- これにより発生する原始重力波の痕跡として、宇宙背景放射(CMB)に現れる偏光の空間的パターン(Bモード)を測定する
- CMB以外に銀河系内からの放射(シンクロトロン放射やダスト放射など)をスペクトル形状から成分分離するために、35GHzから450GHzの観測帯域にて偏光測定を行う
- 主光学系はコンパクトでありながら広視野に対応したクロス・ドラゴンタイプで、主鏡・副鏡共にアナモルフィック非球面である
- 主鏡より空側にある入射開口位置に、空からの直線偏光成分を望遠鏡以降に人工的に持ち込まれる成分から分離するための連続回転半波長板(HWP)を設置する

光学系に求められる仕様

• 仕様

- 入射瞳径: 400mm以上⇒大きいほどキャリブレーション性能が向上する
- 画角: x 方向 $\pm 10.5\text{deg}$, y 方向 $\pm 5.5\text{deg}$ ⇒広いほど全天サーベイが速い
- Fno: 3.5~2.5⇒全体の大きさとPSF径を決める
- 周波数: 35~450GHz: 設計には波長として切りの良い150GHzを使用
- ミラーと瞳は150mm以上離す: 構造を考慮
- 光束と瞳位置は150mm以上離す: HWP設置を考慮
- フード等も含めて $\phi 1.7 \times h 1.7\text{m}$ の領域に納まること: フェアリングサイズ

• 設計時に押さえている「性能以外」のパラメタは以下のもの

- 光軸交差角: 112deg程度⇒直角より迷光に強い
- 各画角での像側telecentricity $< \pm 0.5\text{deg}$
- 各画角での実効Fno = 各画角での実効焦点距離
- 各画角でのPSFのeccentricity < 0.02
- 光束~光学素子(ミラーや瞳等) $> 30\text{mm}$ ⇒回折迷光を防ぐため

光学系に求められる性能

- 結像性能は波面収差(ストレール強度:SD)で評価する
- ミラーを用いた反射光学系であるため所謂色収差は存在せず、周波数毎の性能は単に係数倍となる
- 当然、最も周波数が高い(波長が短い)場合が最悪である
- 波面収差rmsの単位は $[\lambda]$ であるため、波長が λ になるとrmsの値が $\lambda r/\lambda$ 倍となる(λr はレファレンス波長= $2[\text{mm}]=150[\text{GHz}]$)
- ストレール強度SDとrmsの関係は $SD=\exp[-(2\pi*rms)^2]$ である
- 目標性能は、最短波長($1.07[\text{mm}]=280[\text{GHz}]$)において $SD > 0.95$ としたため、 λr では $0.019(rms)=SD0.985$ になる
- 偏光観測を行うため、光学系の偏光特性も良好にしておく必要がある
- 偏光特性は、簡単には偏光面の回転量、詳細にはMueller Matrixの非対角成分の大きさを評価した
- ミラー形状や構成だけでなく、アルミ反射面の物性値も考慮した
- 但し、アルミも保護膜も極低温の値ではなく、**170K近傍の値**である

設計方針

- 光学系はy方向(図1紙面内)のみ偏心しており、x方向は左右対称
- 主鏡はy方向にshiftしたアナモルフィック非球面(後述)
- 副鏡は、y方向にshift & tiltしたアナモルフィック非球面
- 像面は図2のようにx方向が長い形状をしており、設計時の評価画角は図2の●位置と●位置である(●は有効径計算のためだけ)
- 設計後の評価は視野全面に亘って行っている
- 但し、長方形(青枠)の視野になるか楕円(黄色部)になるかは未定

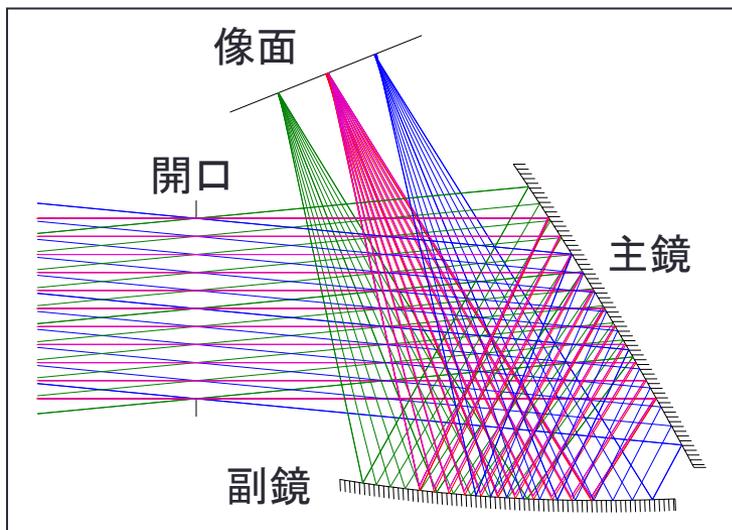


図1

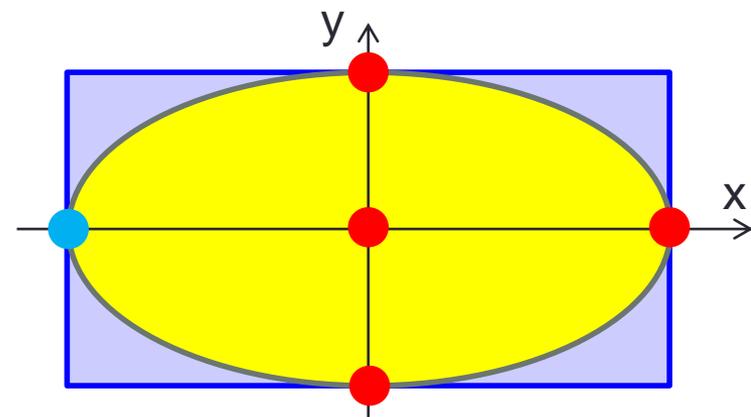


図2

設計自由度とconstraints

- 各項目に関して、constraintsを概算すると以下のようなになる
 - 光束と瞳位置は300mm以上離す……1
 - 光軸交差角:112deg程度……1
 - 各画角での像側telecentricity $< \pm 0.5\text{deg}$ ……4
 - 各画角での実効Fno = 各画角での実効焦点距離……4
 - 各画角でのPSFのeccentricity < 0.02 ……4
 - 光束～光学素子(ミラーや瞳等) $> 30\text{mm}$ ……5
- これらを足すとconstraintsは合計19となる
- 従来のクロスドラゴン光学系では、主鏡・副鏡共に偏心コニック面が用いられていたが、それでは各面でR(主曲率半径)とk(コニック係数)、偏心4自由度で6自由度しかない(偏心はy方向のみとする)
- 主鏡・副鏡合わせても12自由度であり、constraintsだけ考えても明らかに自由度が不足している
- 当然、これらを抑えた上で「収差補正」も行う必要があり、全然足りていないことは明らかである

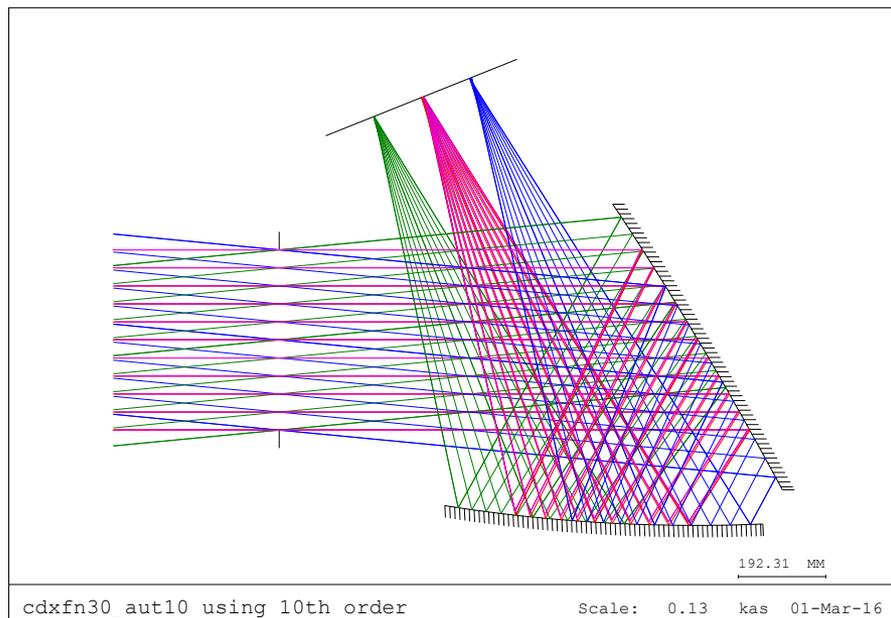
アナモルフィック非球面

- アナモルフィック非球面は、以下の式で表される曲面である
- x方向とy方向でそれぞれ異なるR・k・非球面係数をもつ形状であり、**回転対称ではないが、x軸・y軸に関しては対称**である

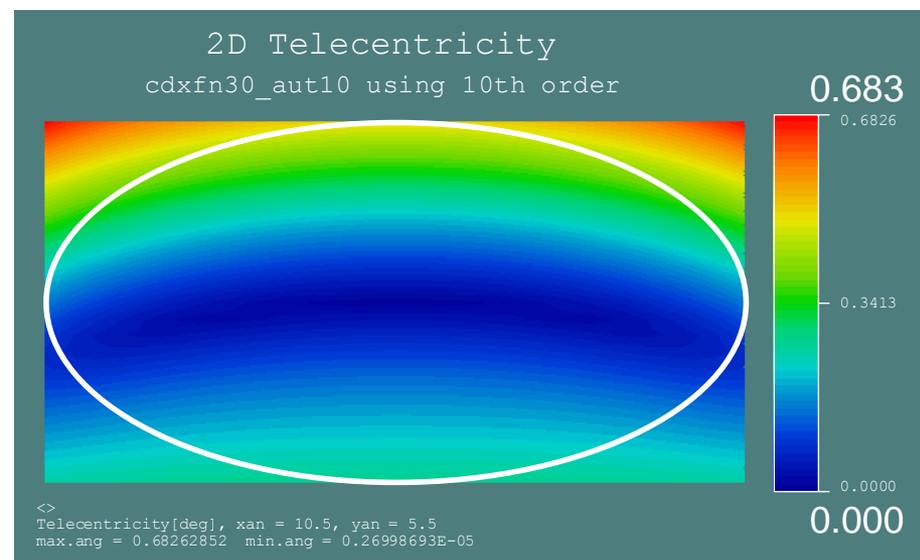
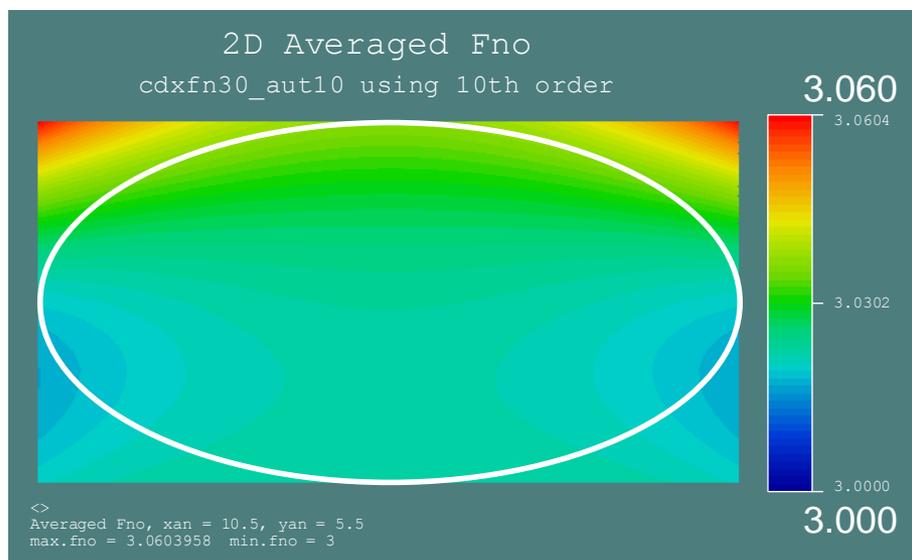
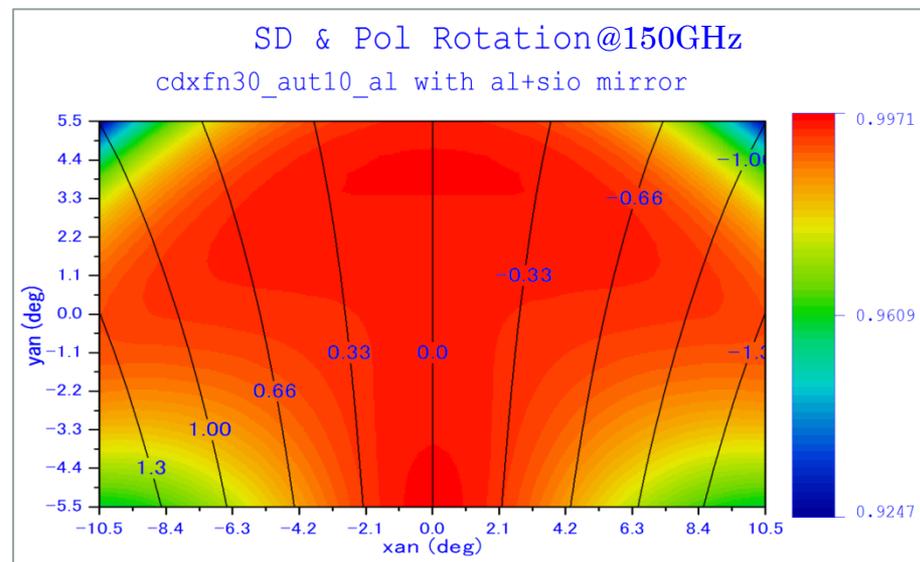
$$z = \frac{(cux)x^2 + (cuy)y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + kx)(cux)^2 x^2 - (1 + ky)(cuy)^2 y^2}} + ar\{(1 - ap)x^2 + (1 + ap)y^2\}^2 + br\{(1 - bp)x^2 + (1 + bp)y^2\}^3 + cr\{(1 - cp)x^2 + (1 + ap)y^2\}^4 + dr\{(1 - dp)x^2 + (1 + dp)y^2\}^5$$

- ここで、cux, cuyはx, yの曲率、kx, kyはx, yのコニック係数、ar, ap等は非球面係数を表す
- 設計に自由曲面を使うという手もあるが、全く対称性のない面形状は見通しが悪く扱いにくい
- 上記**10次までの係数を全て用いれば自由度は12**となり、主鏡・副鏡合わせると**24自由度**となるため、設計自由度が格段に上がる
- これが、主鏡・副鏡共にアナモルフィック非球面を用いた理由である

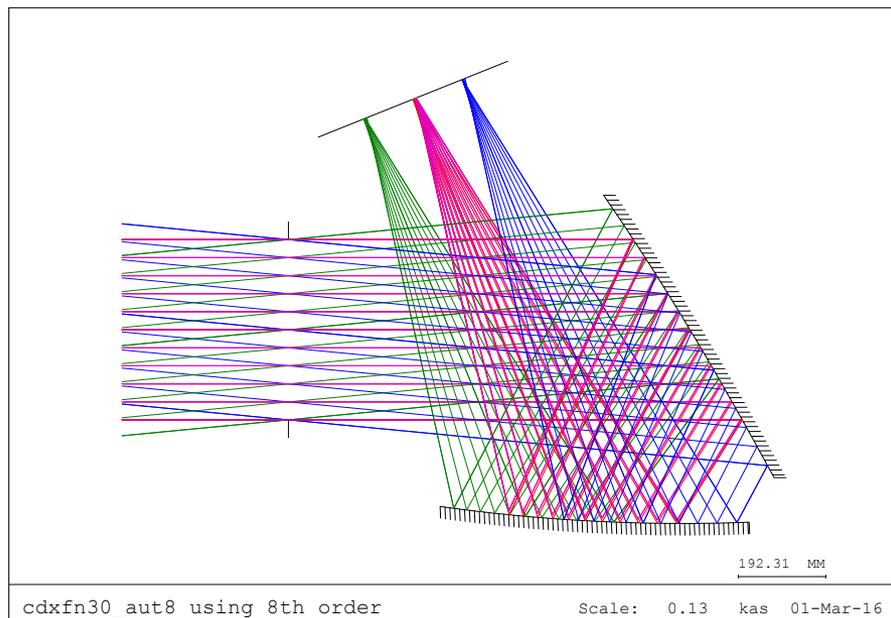
Fno=3.0



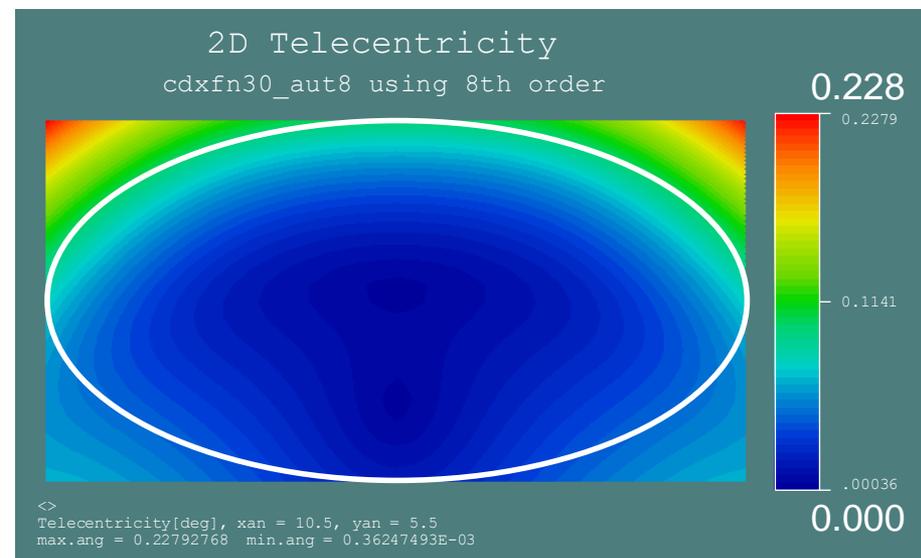
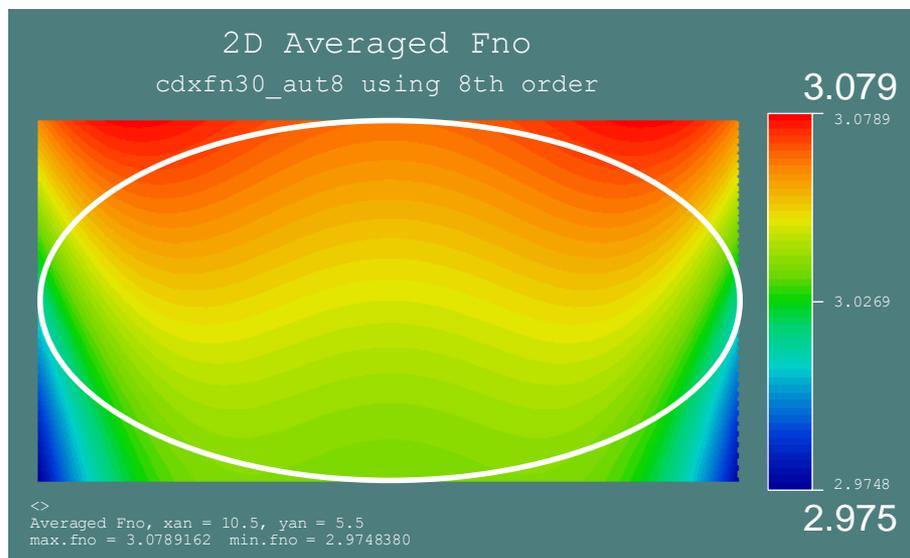
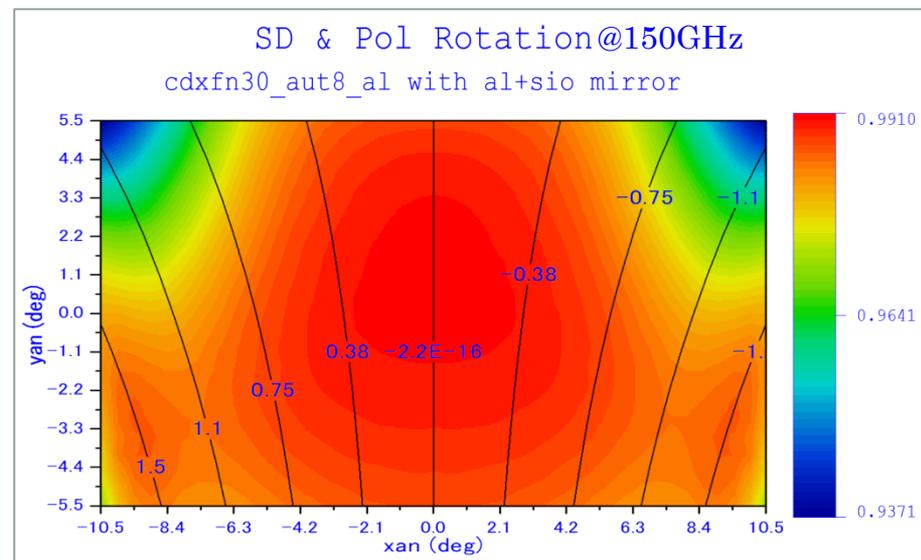
10次まで使用



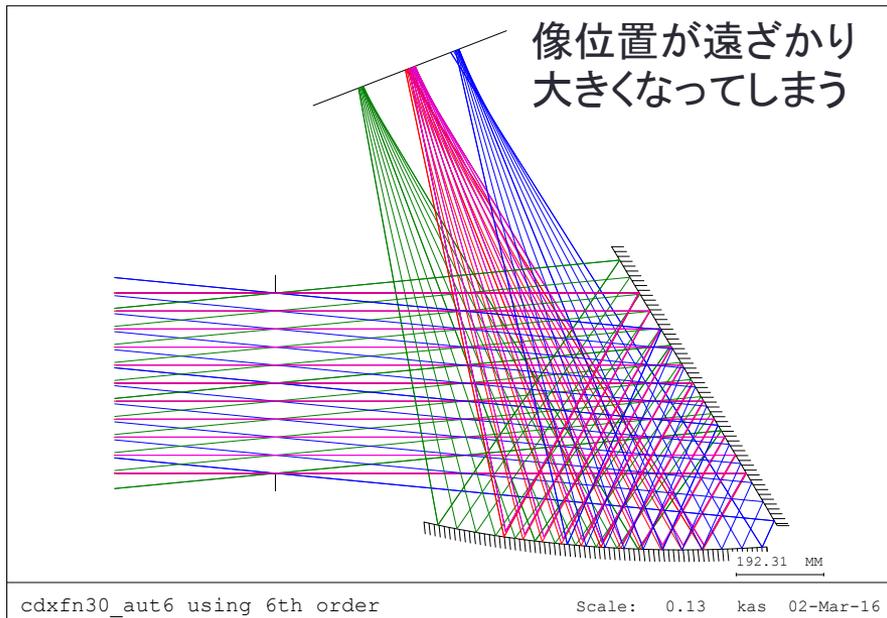
Fno=3.0



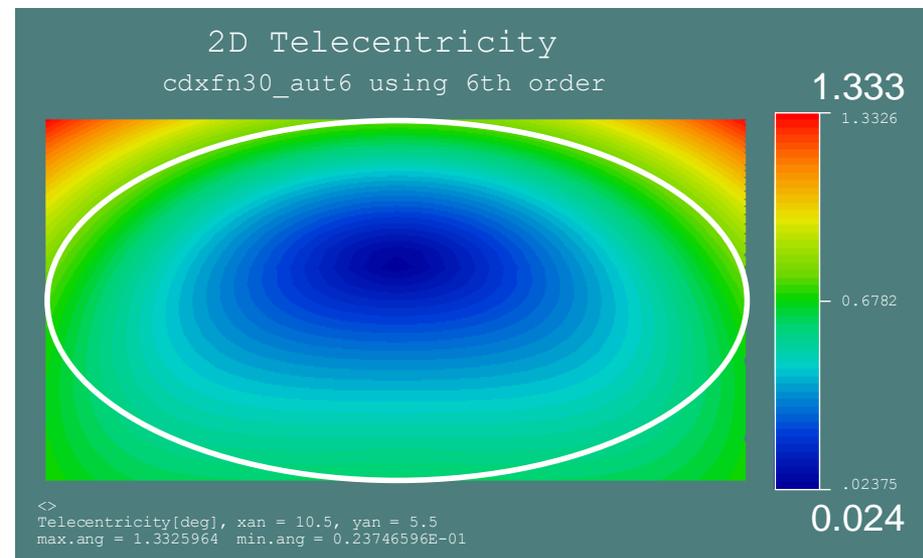
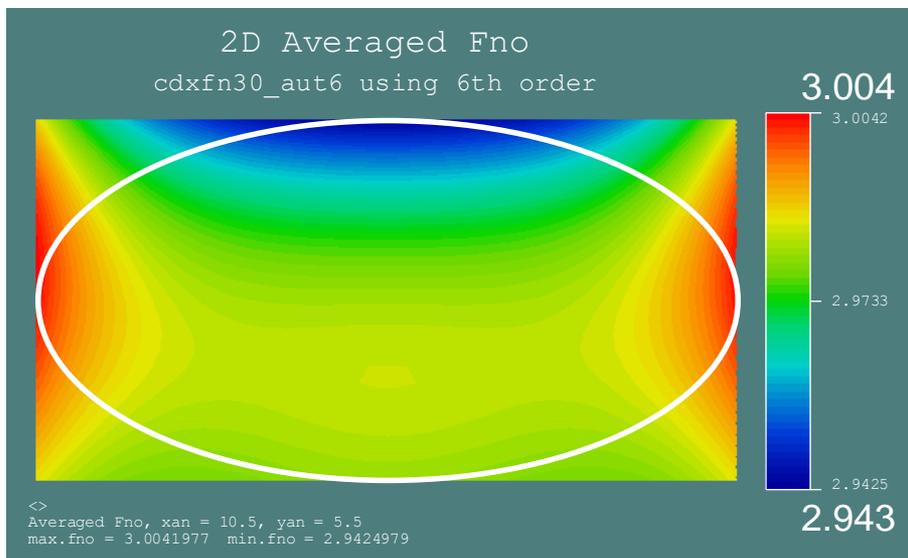
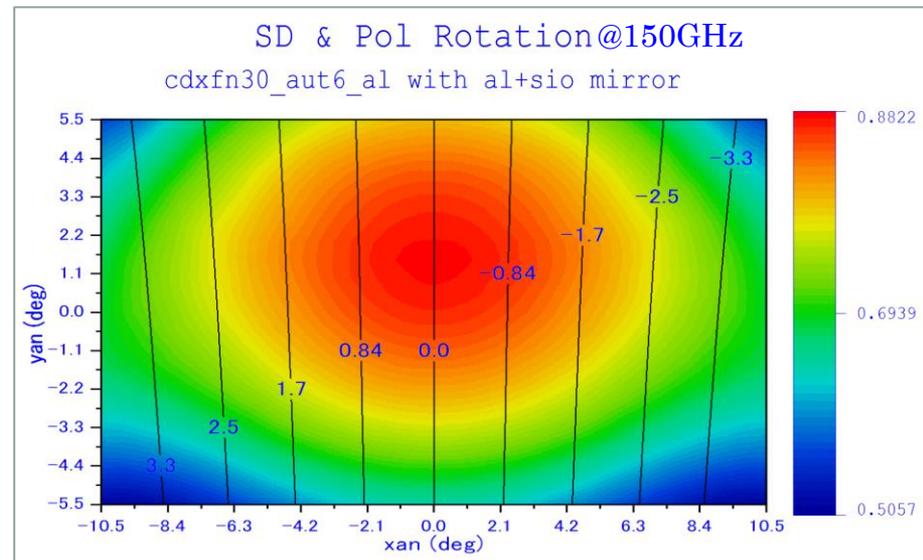
8次まで使用



Fno=3.0

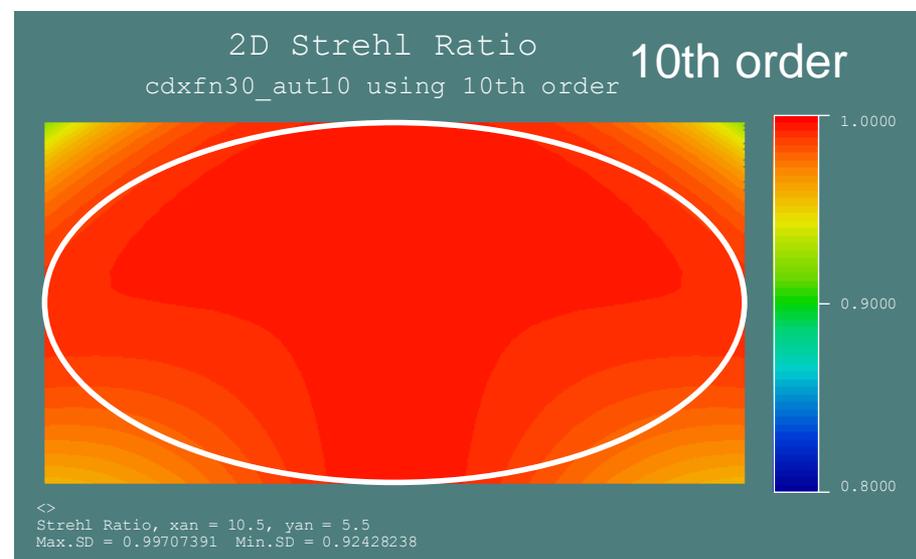
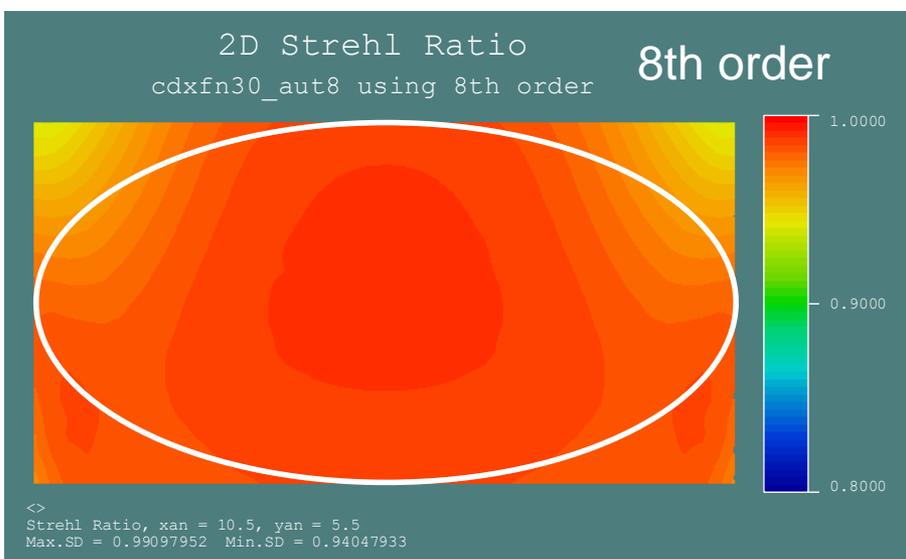
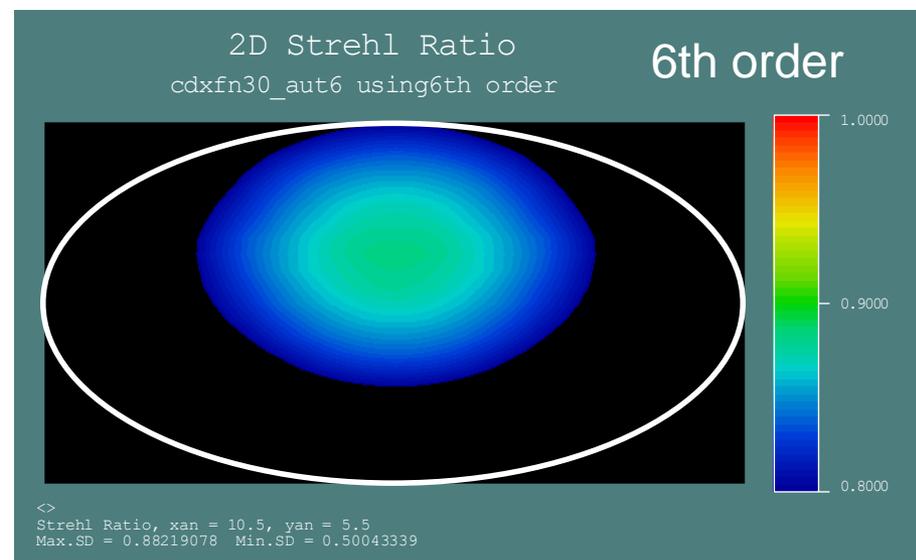


6次まで使用



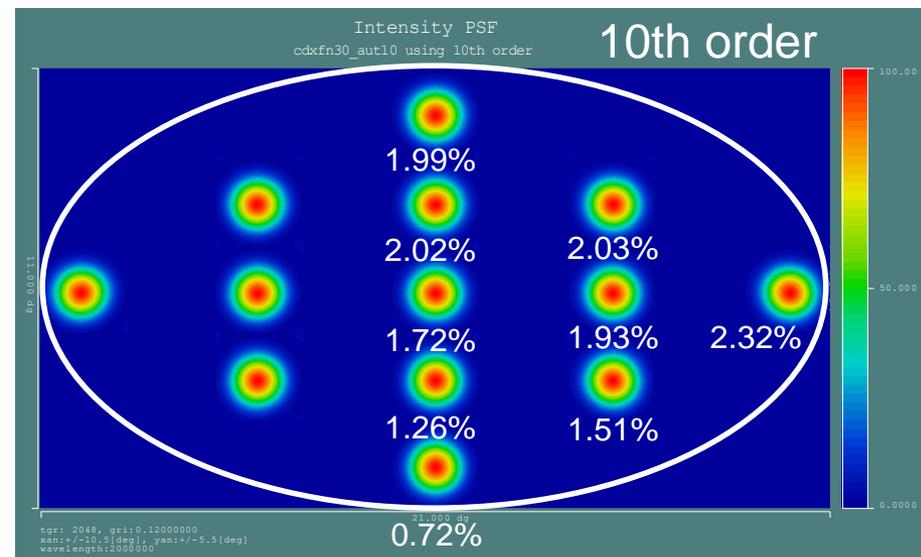
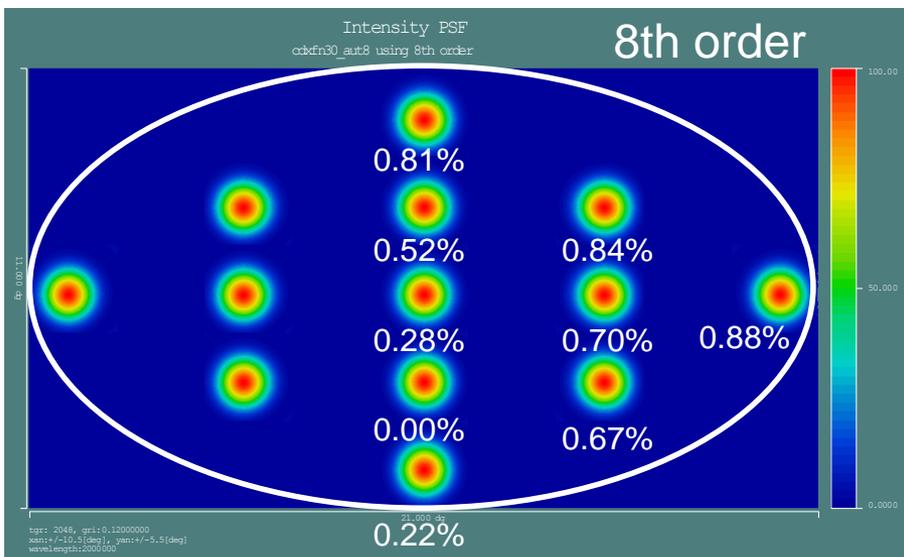
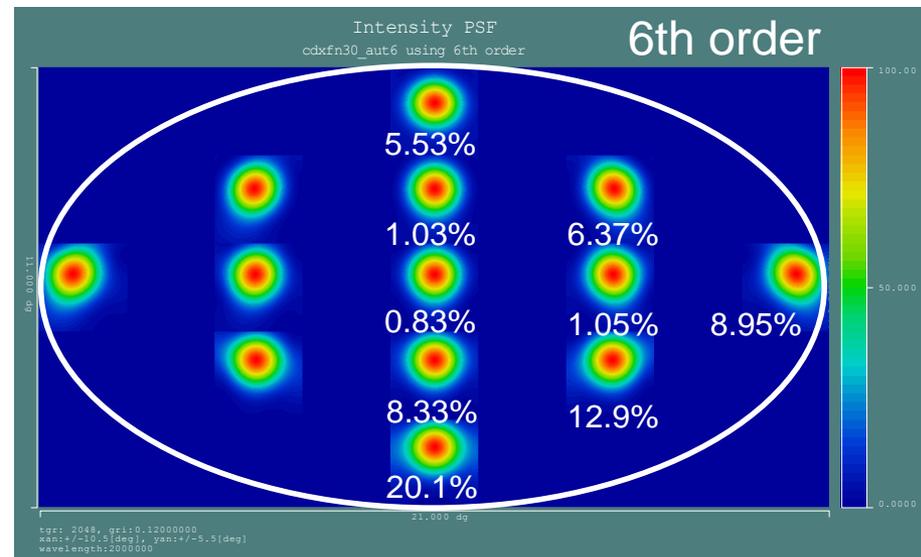
- 10次・8次・6次まで使用した場合のSD@150GHzの同レンジ(1.0~0.8)比較
- 白楕円の領域で見ても、6次までしか使っていないものは全然性能が出ていない
- 8次と10次はそれほど変わらないが、良く見ると白楕円内の均一さが違い、やはり10次まで使った方が性能が出ている
- 但し、設計性能での比較なので差があるが、実際に作れば差は無いと思われる
- 8次までと10次までで製造性に差があるなら、8次の方でもOKと思われるが、たぶんそんなことはないだろう

Fno=3.0 SD比較



- 視野の中の13点に関してPSFを計算し、並べて表示したもの
- 視野の大きさに対するPSFの大きさは実寸ではなく、真円度を見るためのマップ
- 10次・8次はあまり変わらないが、6次までしか使っていないものは真円度も悪い
- 特に視野下半分が著しく劣化している
- 図内の数字[%]は、計算したPSFを偏心・傾きをもった楕円ガウスでfittingし、その長径a・短径bから計算した離心率である
- 計算式は下記である
 - 離心率 $ecc=(a-b)/(a+b)$

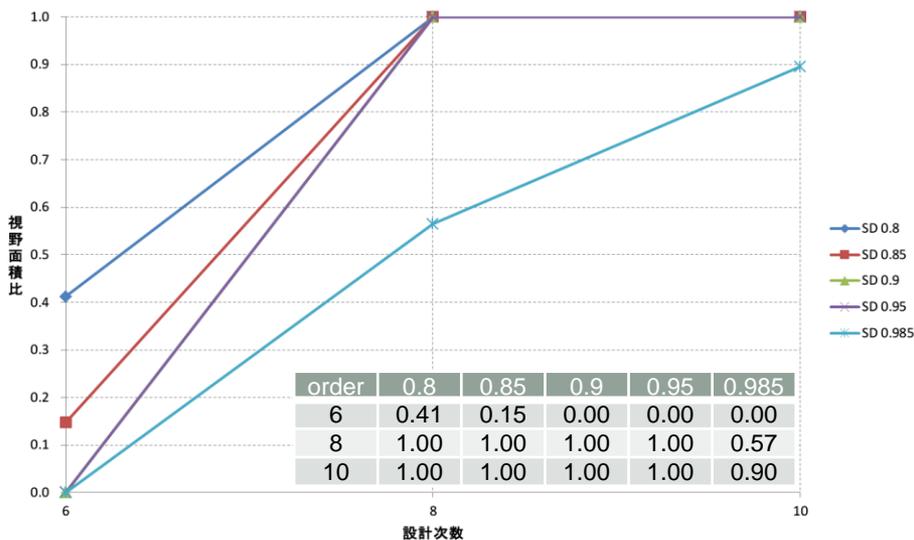
PSF真円度比較



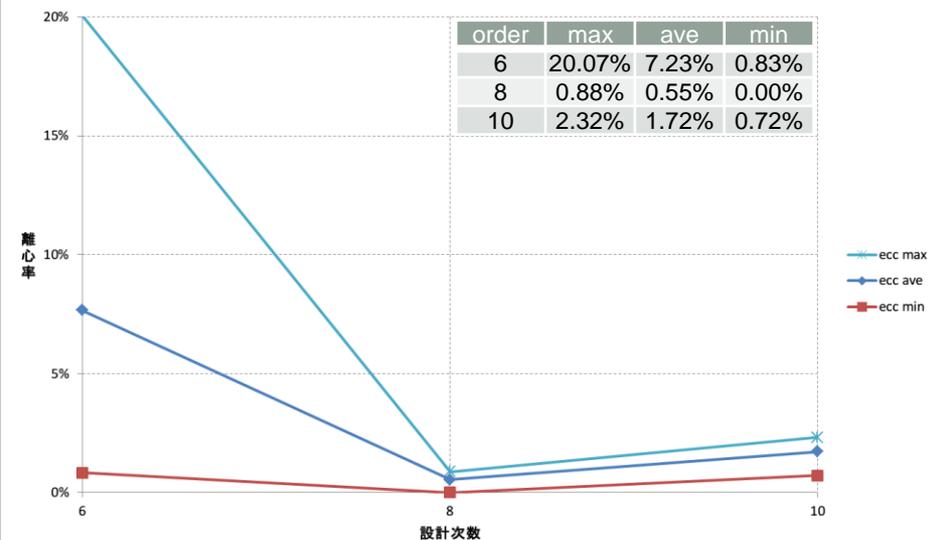
設計次数 vs. 実視野 & PSF真円度

- SD0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 0.985に関して、設計次数と実視野(性能達成視野)面積をグラフ化したが、やはり**6次は非常に実視野が狭い**
- SD0.9はSD0.95と全く同じ数値なので、下図では重なってしまっている
- 面積は、SDマップに楕円をfittingさせて、その面積比で見積もった
- PSF真円度に関して、離心率Max, Average, Minを設計次数に対してグラフ化した
- 8次設計が10次より離心率が小さいが、特に狙った訳ではなくたまたまである(設計時に厳密にPSF離心率を抑えるのは不可能である)

Fno=3.0 設計次数 vs 性能達成視野面積



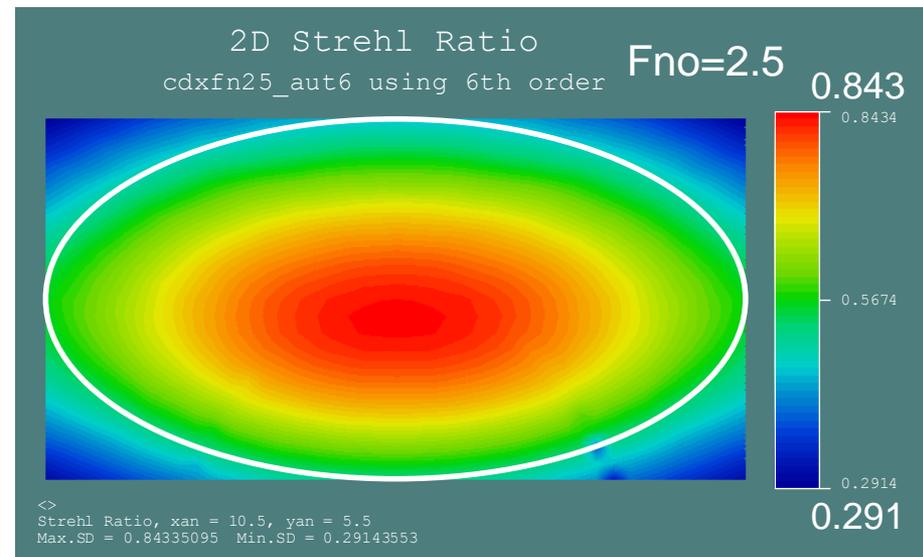
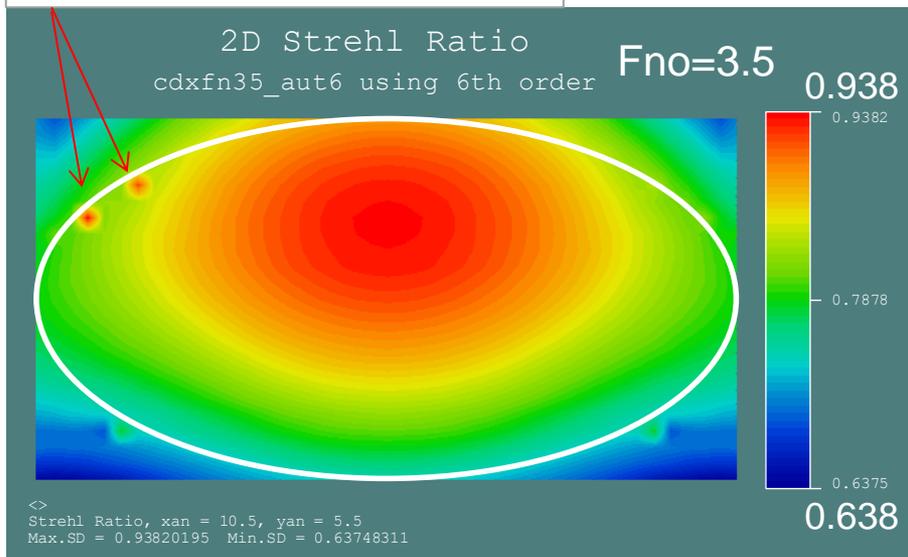
Fno=3.0 設計次数 vs PSF離心率



Fno=3.5 & Fno=2.5

- 同様の解析をFno=3.5と2.5に関しても行った(Fno以外の仕様は同じ)
- 6次までしか使わなかった場合のSDマップを以下に示す
- 予想通り、Fnoが小さくなると低い次数しか使わない場合、著しく性能が劣化している
- Fno=3.5では最悪SDが0.638であるが、Fno=2.5では0.291まで低下
- Fno=3.0では最悪SDが0.506なのでreasonableな結果となっている

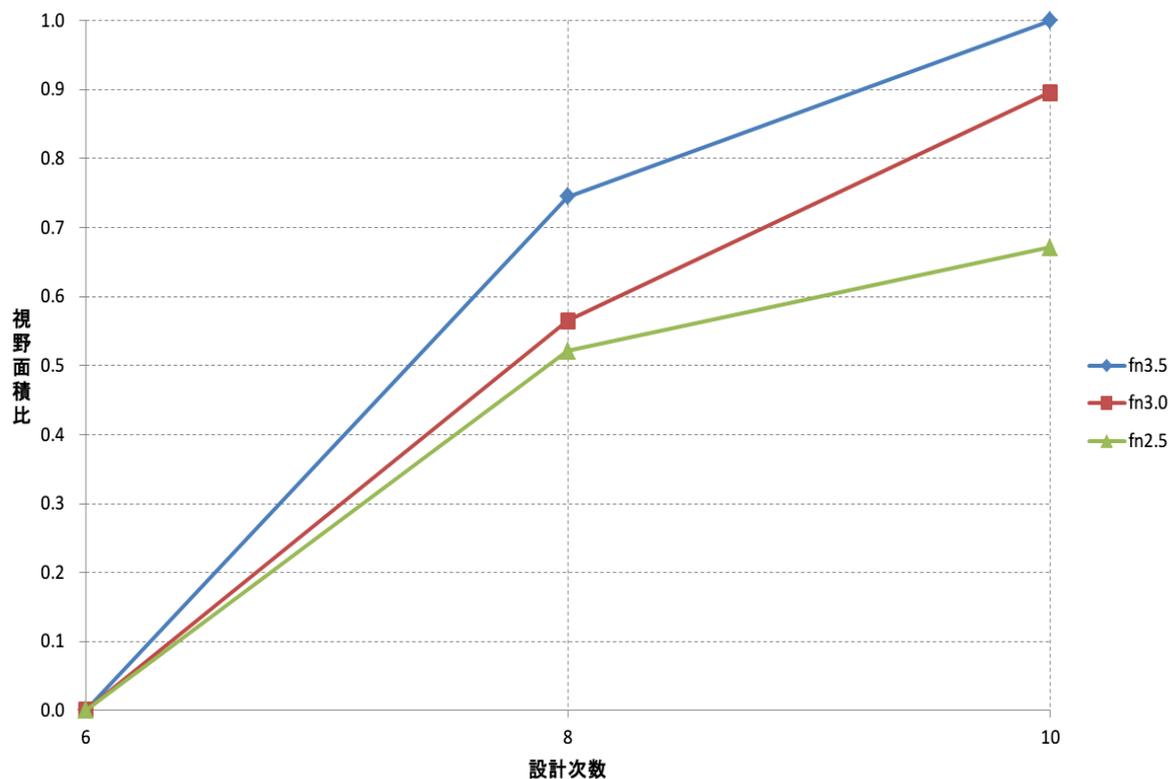
これらは計算orマップ作成エラー



各Fnoの比較

- SD>0.985という究極の性能を満たす視野面積に関して、Fnoと次数で比較したグラフを示す
- Fnoによって像面の大きさは変わるため、**画角の広さ(x画角*y画角)**を表していることになる

設計次数 vs SD0.985達成視野面積



- このオーダーでは10次と8次の差も結構あることが分かる
- Fnoが小さいほど、より大きな次数まで必要なことも分かる
- 10次を使ってもFno=3.5以外では完全には全視野で性能を満たせてはいない
- 但し、Fno=3.5はPSF、ひいては検出器や光学系全体が大きくなるという問題があり、これがBestという訳ではない

まとめと今後の展開

- 今回は開口径 $\phi 400\text{mm}$ のものしか示さなかったが、設計検討は開口径 $\phi 550\text{mm}$ や $\phi 600\text{mm}$ についても行っている
- 打上時の搭載スペースが限られるため、開口径を大きくしても焦点距離を伸ばして全体を大きくすることはできないため、必然的に Fno が小さくなってしまう
- そのため、例えば開口径 $\phi 600\text{mm}$ のものでは、8次まで使っても所望の性能が出ず、10次が必須となる
- 設計時に高次の項が必要ということは、それだけ面形状に敏感ということであるから、製造性が悪くなる(製造誤差に弱い)方向である
- 何れにせよ、8次や10次の高次項は設計上必須であり、この原因は、多くのconstraintsを抑える必要があることもあるが、それ以上にレンジで $21 \times 11[\text{deg}]$ という極めて広い視野で性能を出したからである
- 偏光特性に関しても、8・10次は良好であるが、やはり6次までの設計では偏光回転量が大きく、偏光特性も劣化していることが分かる、
- 今後は、設計性能と製造性、キャリブレーション性能や波長板の口径制限等に留意しつつ、LiteBIRDに最適な解を見つけていく