

# LiteBIRDで使用する光学部材の 陽子線による影響(3)

小松国幹, 石野宏和, 樹林敦子, 魚住聖, 山田要介, 喜田洋介, 舟木巧,  
秀平直人, 松村知岳<sup>A</sup>, 羽澄昌史<sup>B</sup>, 南雄人<sup>B</sup>, 片山伸彦<sup>C</sup>, 服部香里<sup>C</sup>, 唐津謙一<sup>D</sup>,  
中村正吾<sup>E</sup>, 入江郁也<sup>E</sup>, 藤野琢郎<sup>E</sup>, 山下徹<sup>E</sup>, 金井啓晃<sup>E</sup>, 堀泰斗<sup>F</sup>, 鈴木有春<sup>F</sup>,  
Ben Westbrook<sup>F</sup>, Oliver Jeong<sup>F</sup>, Ian Shirley<sup>F</sup>, Johannes Hubmayr<sup>G</sup>,  
他 LiteBIRDワーキンググループ

岡山大, JAXA/ISAS<sup>A</sup>, KEK<sup>B</sup>, IPMU<sup>C</sup>, 国立天文台<sup>D</sup>, 横浜国立大<sup>E</sup>,  
Univ. of California, Berkeley Phys. Dept.<sup>F</sup>, NIST Boulder<sup>G</sup>

# 背景

- LiteBIRDの観測期間は太陽・地球のL2軌道で3年間を予定
- 観測期間中、LiteBIRDは宇宙空間を飛び交う宇宙線（主成分は高エネルギー陽子線）によって被曝する
  - 吸収線量は水換算で最大約2krad/year
  - 宇宙線のフラックスは5particles/cm<sup>2</sup>/s
- LiteBIRDでは1/fノイズの軽減などの目的から半波長板を用いた偏光変調装置を用いる予定である
- 放射線による被曝は半波長板等の光学部材の光学的特性を変化させる恐れがある

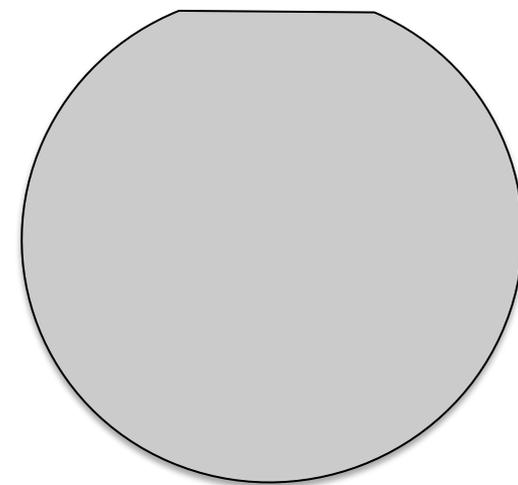
# 目的

- 事前に部材の放射線耐性を検証する必要がある
- 放射線医学総合研究所のHIMACを利用し、光学部材となる可能性のある物質に対して陽子ビーム照射実験を行った
- 照射実験の前後で光学的特性(屈折率、 $\tan\delta$ )の比較を行うことで光学部材の放射線耐性を評価する
- 前回学会では周波数帯域F-band(90~140GHz)のみで評価を行ったが今回はF-bandとW-band(75~110GHz)の2つの帯域で半波長板の部材であるサファイアに関して評価を行った

# サンプルリスト

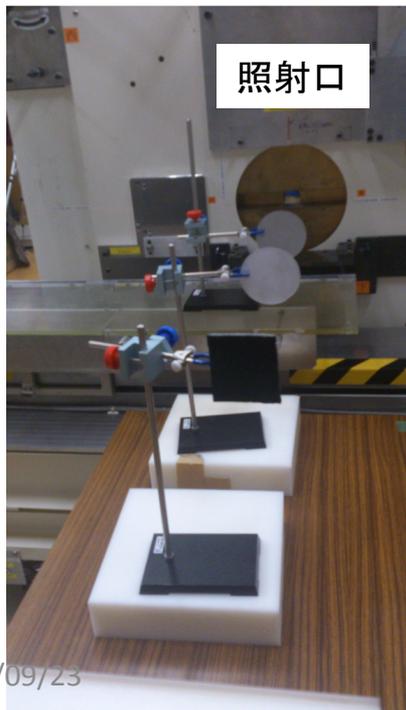
- 放射線耐性の評価を行った帯域
  - F-band (90~140GHz)、W-band(75~110GHz)
- 半波長板として用いられるサファイアは複屈折の性質を持つので、それぞれの光学軸について評価

サンプル名	形状
サファイア (京セラ製、a-cut)	直径100mm 厚み $2.530 \pm 0.001$ mm
サファイア (信光社製、a-cut)	直径100mm 厚み $2.531 \pm 0.002$ mm



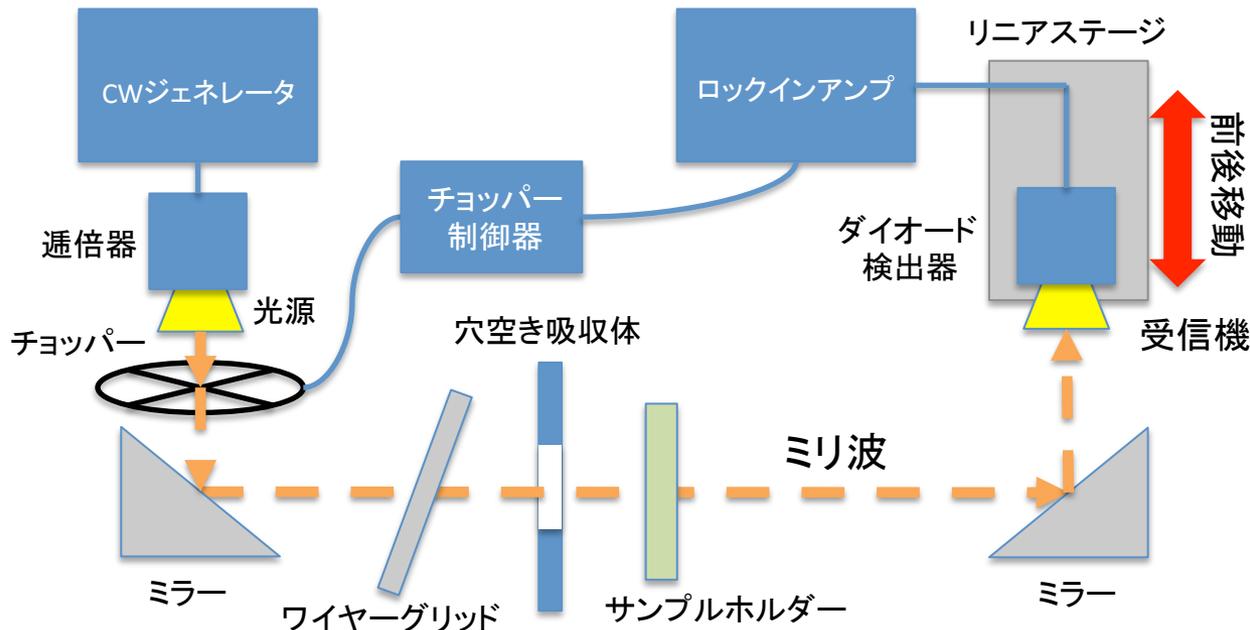
# HIMACにおける陽子ビーム照射実験

- HIMACにて2016年7月3日晚から4日朝方にかけて実験
- ビームエネルギー：160MeV
- 照射フルエンス： $1.2 \times 10^{11}$  protons/cm<sup>2</sup>
- ビームの断面：4x4cm<sup>2</sup>の正方形
- 照射量：水換算で10krad(観測期間約5年分)



# 光学的特性の測定

- 照射実験前後の比較に用いるのは屈折率と $\tan\delta$
- サンプルの透過率の周波数依存性を理論式を用いてフィットすることで求める
- 透過率の測定は松村知岳さん(JAXA/ISAS)が構築したミリ波透過率測定システム(下:概略図)を使用



光源と受信機間に発生する定在波の平均強度を測定

サンプル有り無しでの強度の比を取ることで透過率を求める

通倍器の倍率

F-band (90~140GHz) : 8倍

W-band (75~110GHz) : 6倍

# 光学系部分の画像



# 透過率の理論式

$$T = \left( \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_s \gamma_0 m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}} \right)^2$$

T: 透過率

$n_{air}, n_{sample}$ : 空気、サンプルの複素屈折率

$k_0$ : ミリ波の波数

$h$ : サンプルの光学的厚み

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_{air} \cos \theta_{iI}$$

$$\gamma_s = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_{air} \cos \theta_{tIII}$$

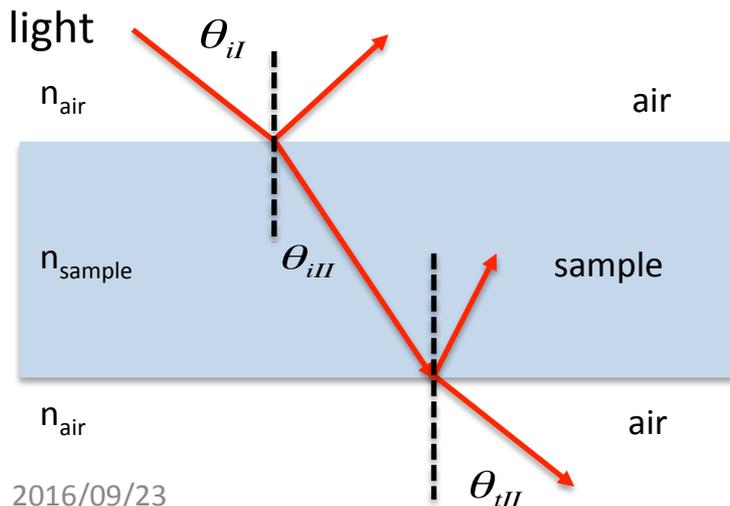
$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_{sample} \cos \theta_{iII} \left( \text{or } \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{n_{sample}}{\cos \theta_{iII}} \right)$$

$$m_{11} = m_{22} = \cos k_0 h$$

$$m_{12} = \frac{i \sin k_0 h}{\gamma_1}$$

$$m_{21} = \gamma_1 i \sin k_0 h$$

( ): 電場Eが入射面内



複素屈折率

$$n = n' - i\kappa$$

$$\kappa \cong \frac{1}{2} n' \times \tan \delta$$

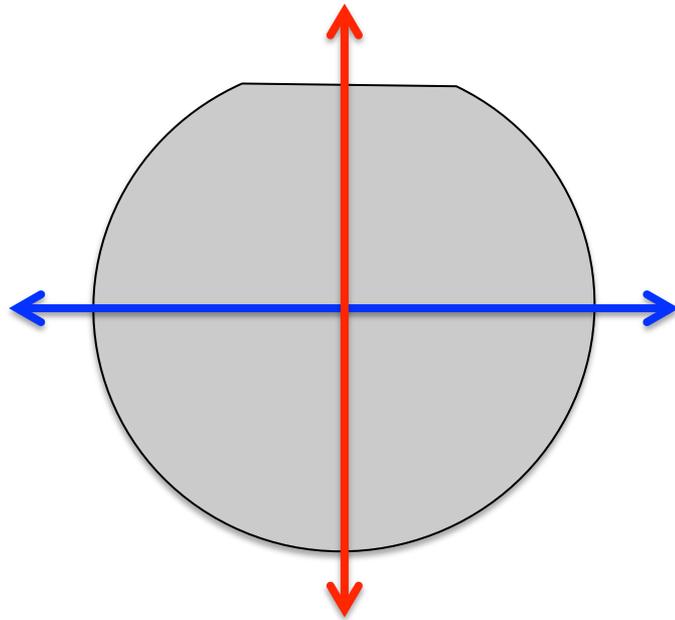
$n'$ : 屈折率

$\kappa$ : 吸収係数

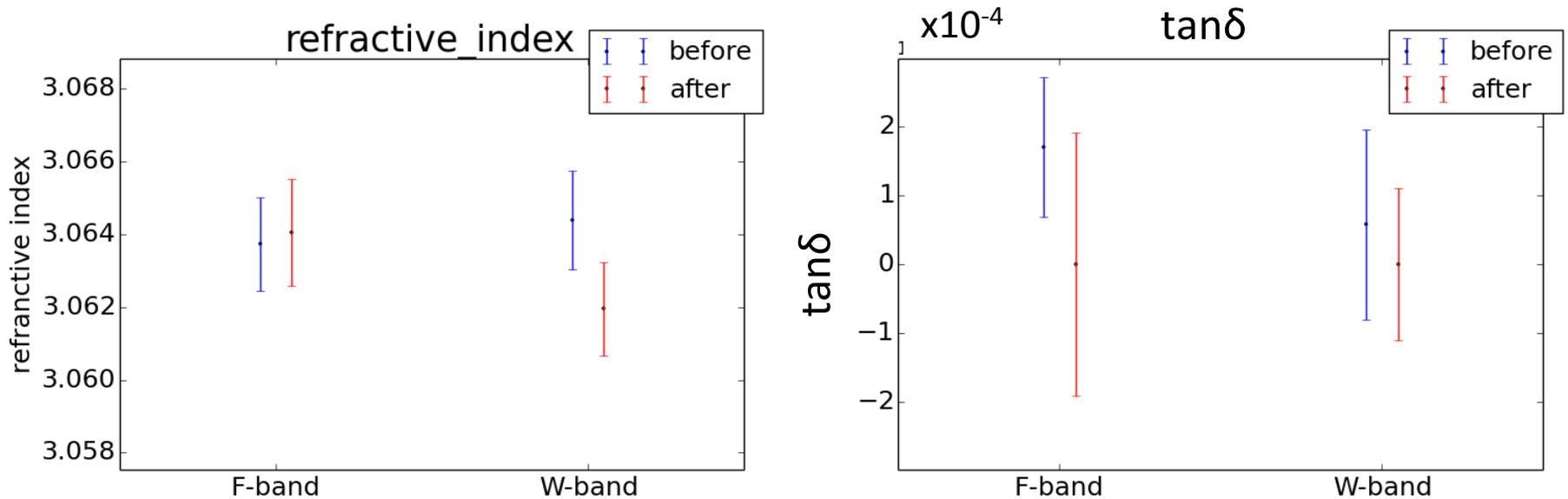
# 比較結果

## サファイアに対する通常光線、異常光線の定義

- 光線は画面に垂直方向に入射
- 通常光線（青）
- 異常光線（赤）

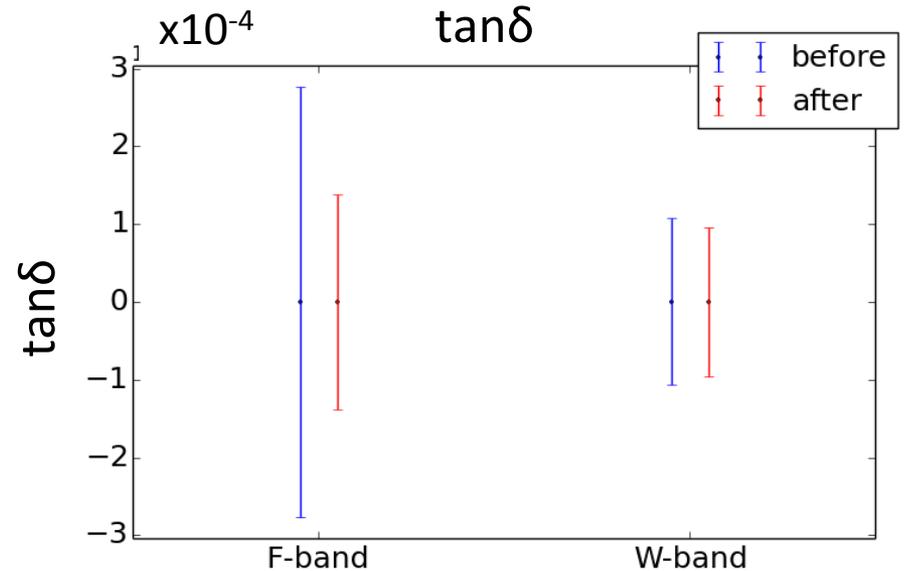
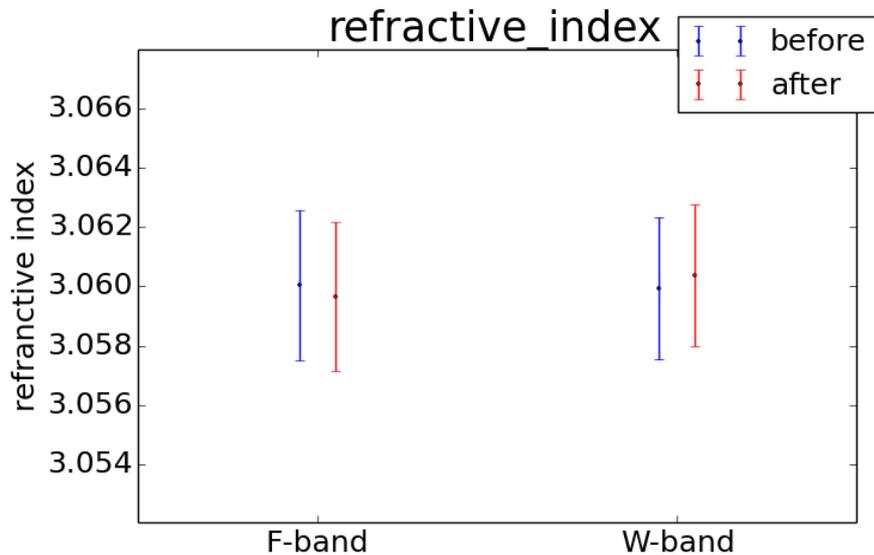


# • サファイア（京セラ製、a-cut）通常光線



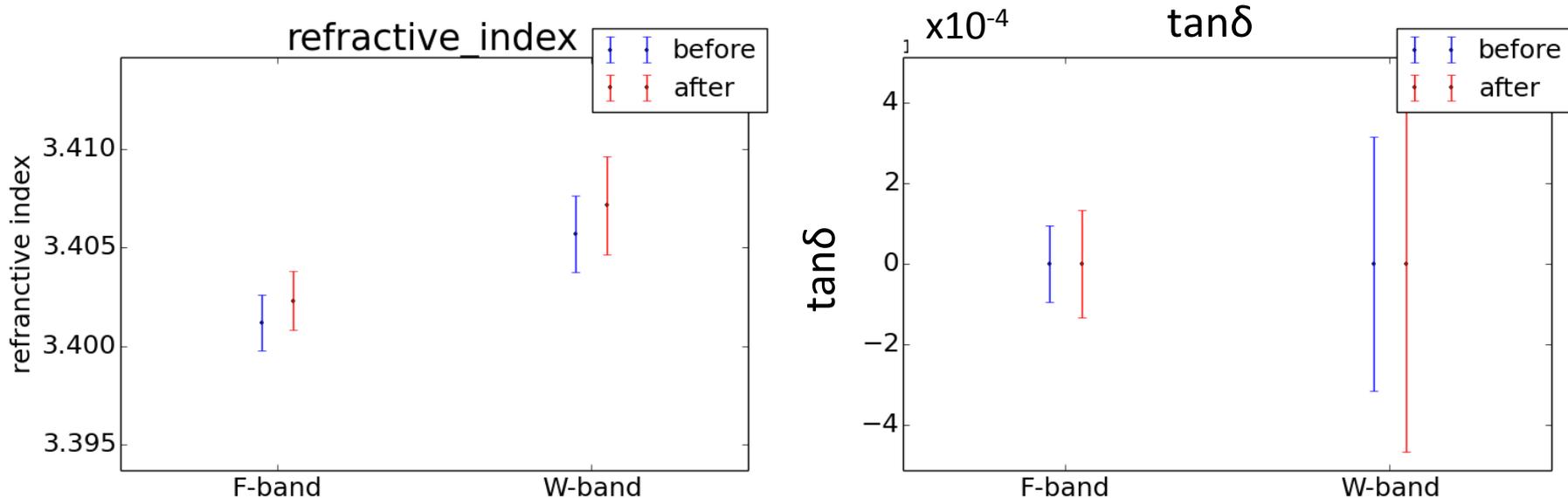
帯域 (GHz)	照射	屈折率		tan $\delta$	
		数値	エラー	数値	エラー
F-band (90~140)	前	3.0637	0.0013	1.7.E-04	1.0.E-04
	後	3.0641	0.0015	2.8.E-09	1.9.E-04
W-band (75~110)	前	3.0644	0.0014	5.8.E-05	1.4.E-04
	後	3.0620	0.0013	2.0.E-08	1.1.E-04

# • サファイア（信光社製、a-cut） 通常光線



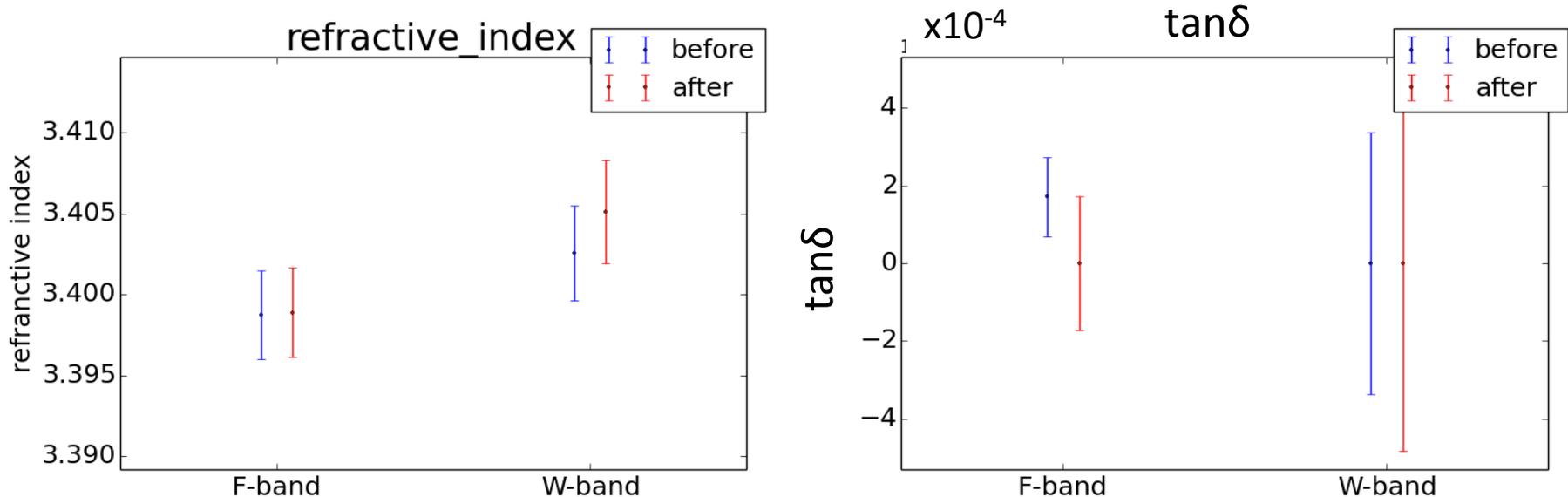
帯域 (GHz)	照射	屈折率		tan δ	
		数値	エラー	数値	エラー
F-band (90~140)	前	3.0600	0.0025	1.6.E-08	2.8.E-04
	後	3.0597	0.0025	8.0.E-09	1.4.E-04
W-band (75~110)	前	3.0599	0.0024	3.0.E-08	1.1.E-04
	後	3.0604	0.0024	2.1.E-08	9.5.E-05

# • サファイア（京セラ製、a-cut）異常光線



帯域 (GHz)	照射	屈折率		tan $\delta$	
		数値	エラー	数値	エラー
F-band (90~140)	前	3.4012	0.0014	1.0.E-08	9.4.E-05
	後	3.4023	0.0015	9.0.E-09	1.3.E-04
W-band (75~110)	前	3.4057	0.0019	3.1.E-08	3.2.E-04
	後	3.4071	0.0025	1.6.E-08	4.7.E-04

# • サファイア（信光社製、a-cut）異常光線

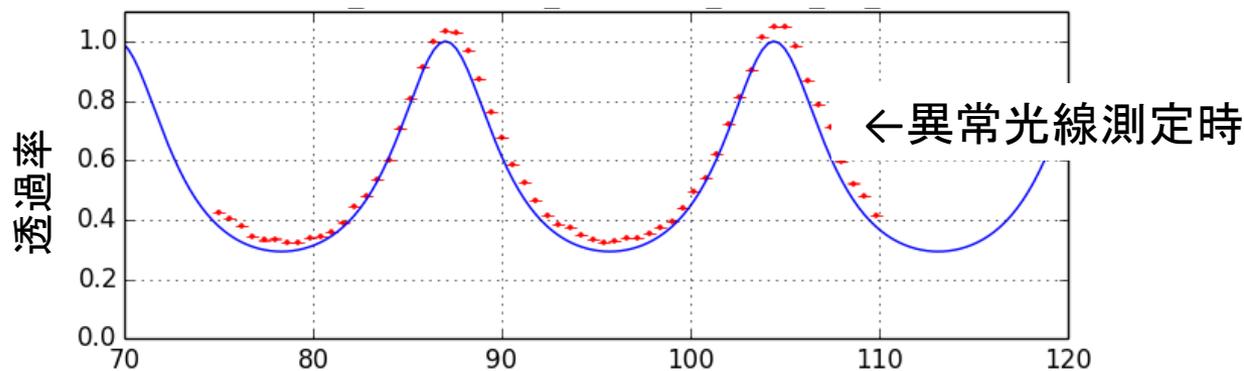


帯域 (GHz)	照射	屈折率		tan $\delta$	
		数値	エラー	数値	エラー
F-band (90~140)	前	3.3987	0.0027	1.7.E-04	1.0.E-04
	後	3.3989	0.0028	7.0.E-09	1.7.E-04
W-band (75~110)	前	3.4026	0.0029	1.8.E-08	3.4.E-04
	後	3.4051	0.0032	7.5.E-09	4.8.E-04

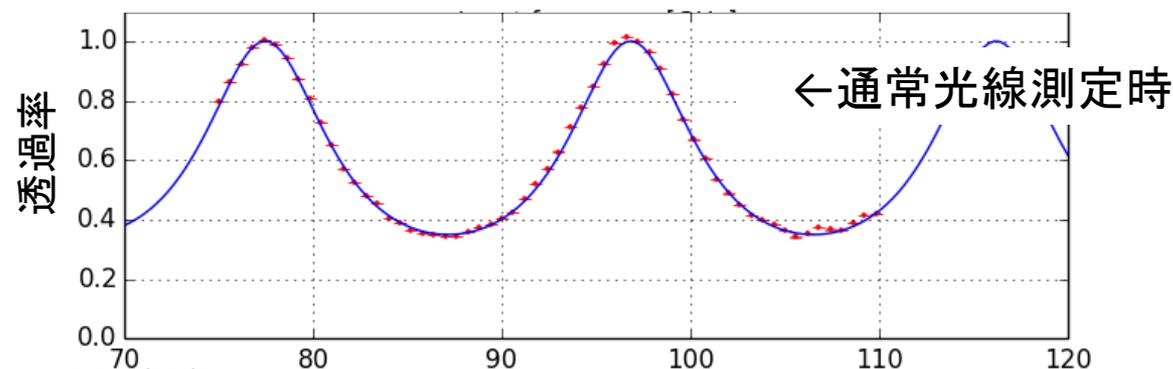
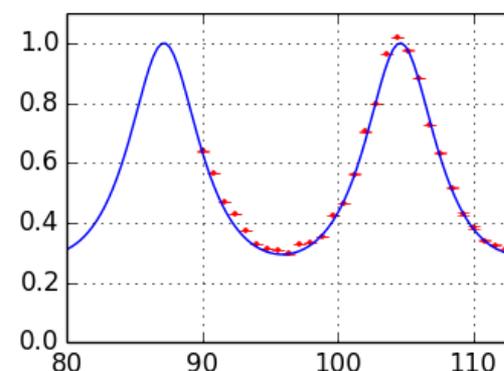
# サファイアの異常光線に対する透過率測定に関して

- W-bandにおいて透過率が測定帯域全体で高くなるという現象が発生した(照射前後、京セラ製と信光社製共通して)
- F-bandの共通する帯域ではこの傾向は見られないことからこの現象は装置由来のものと思われる
- W-bandでの測定の $\tan\delta$ についてはきちんと測定できていない

照射なしサファイア(信光社製、a-cut)



F-bandの共通する帯域での結果



# まとめ

- 照射前後の屈折率に関して
  - どちらのサンプルも照射前後の測定結果は誤差の範囲で一致し、変化は見られなかった
  - 異常光線の結果に関して、W-bandで透過率が大きくなる現象が発生していることからF-bandとW-bandで測定結果が異なった
- 照射前後の $\tan\delta$ に関して
  - W-bandの異常光線測定時の結果は透過率が大きくなる現象が発生していることからきちんと測定できていない
  - その他に関しては誤差の範囲で一致し、変化は見られなかった
- 今後の課題として
  - W-bandでのサファイアの異常光線に対する透過率が大きくなる現象の解決



- back up

$$\begin{aligned}
 n &= \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{\mu_0 \epsilon_0}} \cong \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{real} - i \frac{\epsilon_{imag}}{\epsilon_0}}{\epsilon_0}} \\
 &= \sqrt{\frac{\epsilon_{real}}{\epsilon_0} \left( 1 - i \frac{\epsilon_{imag}}{\epsilon_{real}} \right)} = n' (1 - i \tan \delta)^{\frac{1}{2}} \cong n' - i \frac{1}{2} n' \tan \delta
 \end{aligned}$$

$$n = n' - i\kappa \quad n' = \sqrt{\frac{\epsilon_{real}}{\epsilon_0}} \quad \tan \delta = \frac{\epsilon_{imag}}{\epsilon_{real}}$$

- T data

