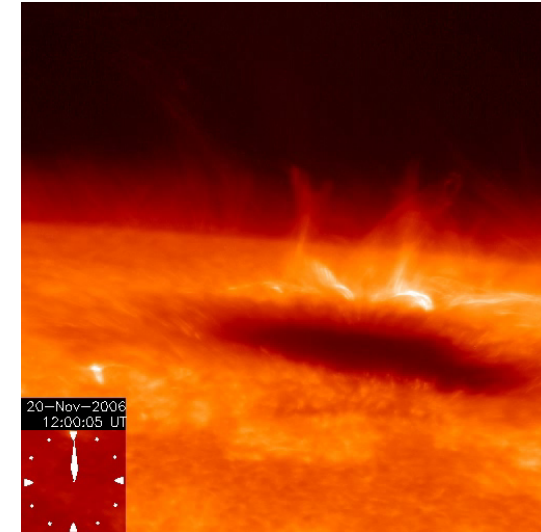
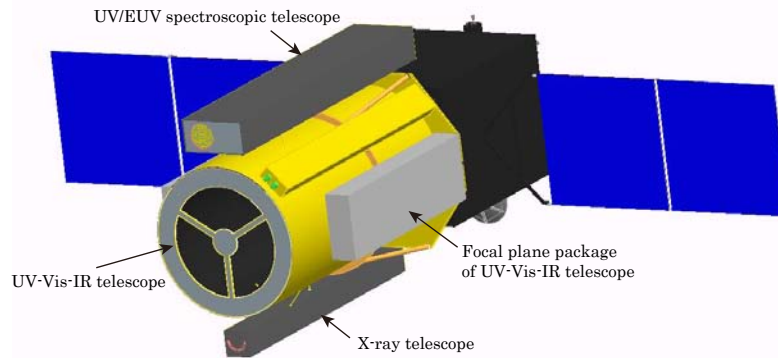


# 高精度 2次元面偏光分光装置に用いる 矩形ファイバーリボンの特性評価

勝川 行雄, 久保 雅仁, 原 弘久, 末松 芳法 (国立天文台),  
一本潔 (京都大学), H. Lin (ハワイ大学)

# SOLAR-Cにおける彩層偏光分光観測: 光ファイバー束による面分光

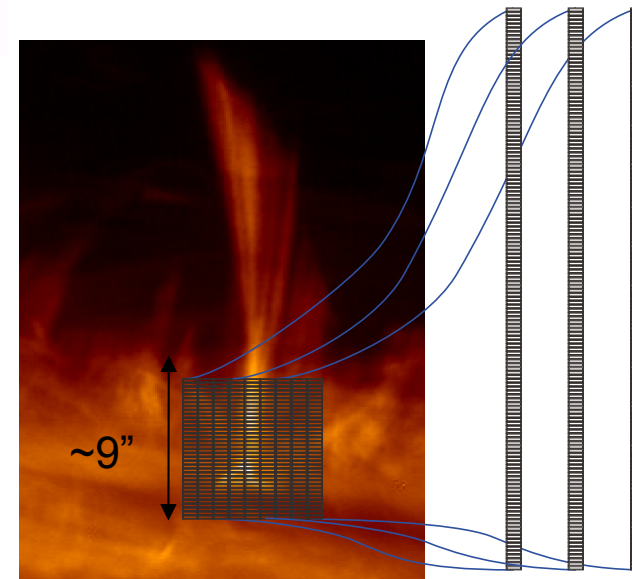
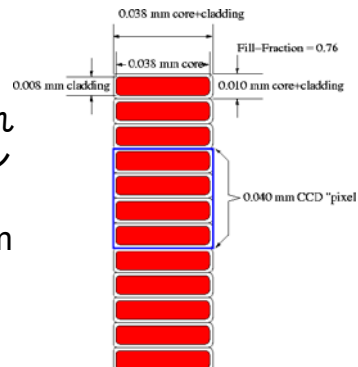
- 次期太陽観測衛星「SOLAR-C」  
大型光学宇宙望遠鏡  
SOLAR UV-Vis-IR Telescope (SUVIT)



- ダイナミックに変動する彩層の偏光分光情報を高速に、かつ2次元的に取得したい  
→ スリット分光では追従できない  
→ 一方、スリット分光も波長分解能やスループットの観点で有利

地上観測用に既に開発された矩形コアファイバーリボン

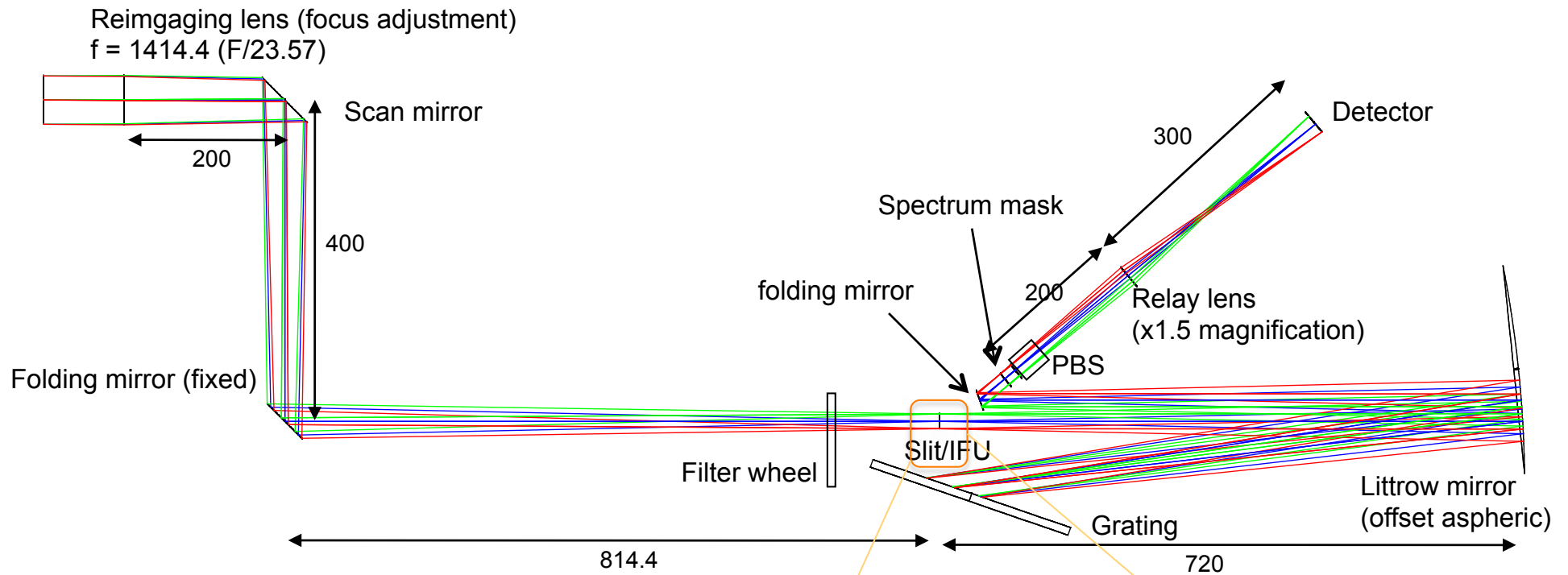
コア+クラッド:  $40\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$   
クラッド厚:  $1\mu\text{m}$



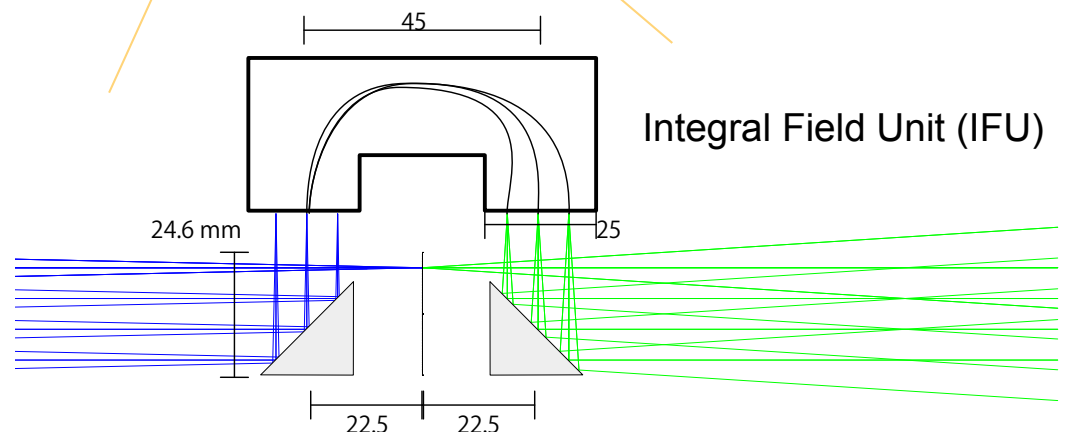
2D array of the fiber array at the entrance

Converted into 3 1D-slits at the exit

# SOLAR-C SUVIT 偏光分光観測装置 (SP)

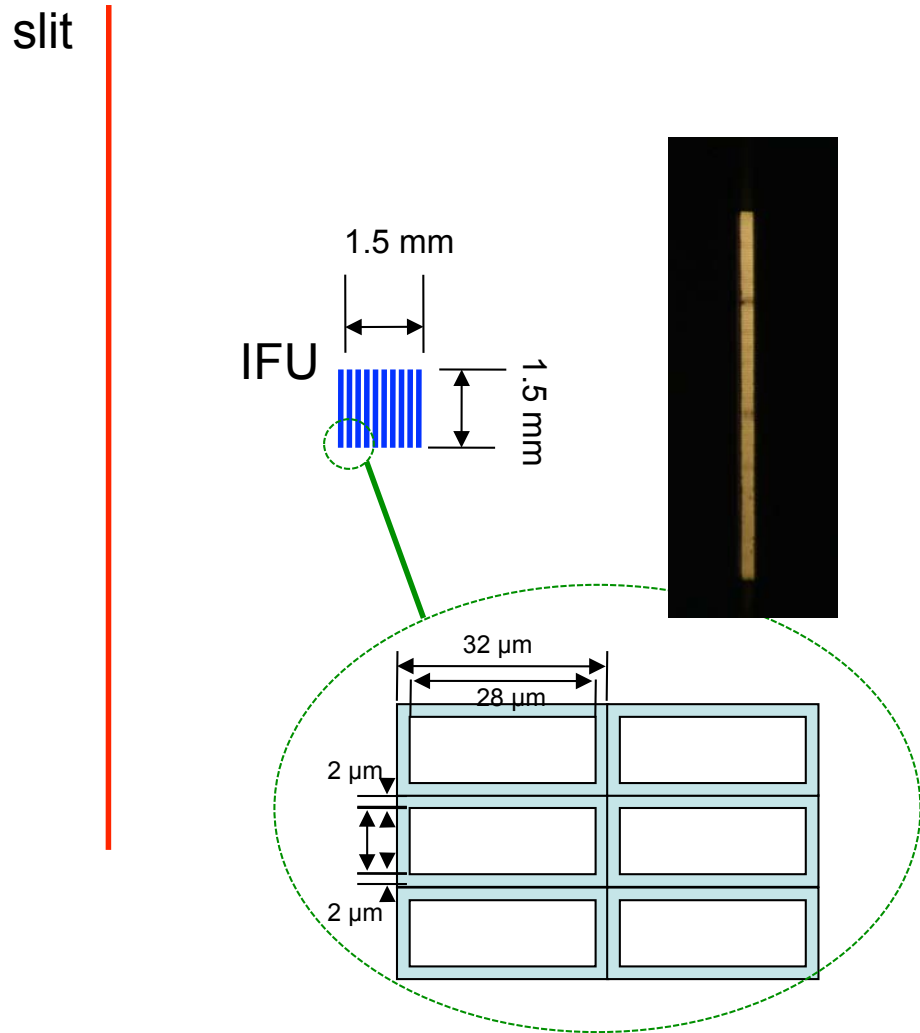


- Spatial resolution
  - <0.2" sampling for chromospheric lines
  - <0.1" sampling for photospheric lines
- Spectral resolution
  - Chromospheric line:  $\lambda/\delta\lambda > 1 \times 10^5$  ( $\delta V < 2 \text{ km/s}$ )
  - Photospheric line:  $\lambda/\delta\lambda > 2 \times 10^5$  ( $\delta V < 1.5 \text{ km/s}$ )
- Wavelength coverage
  - Chromospheric line: He I 1083 nm & Ca II 854 nm
  - Photospheric line: Fe I 525 nm (or Fe I 630 nm)

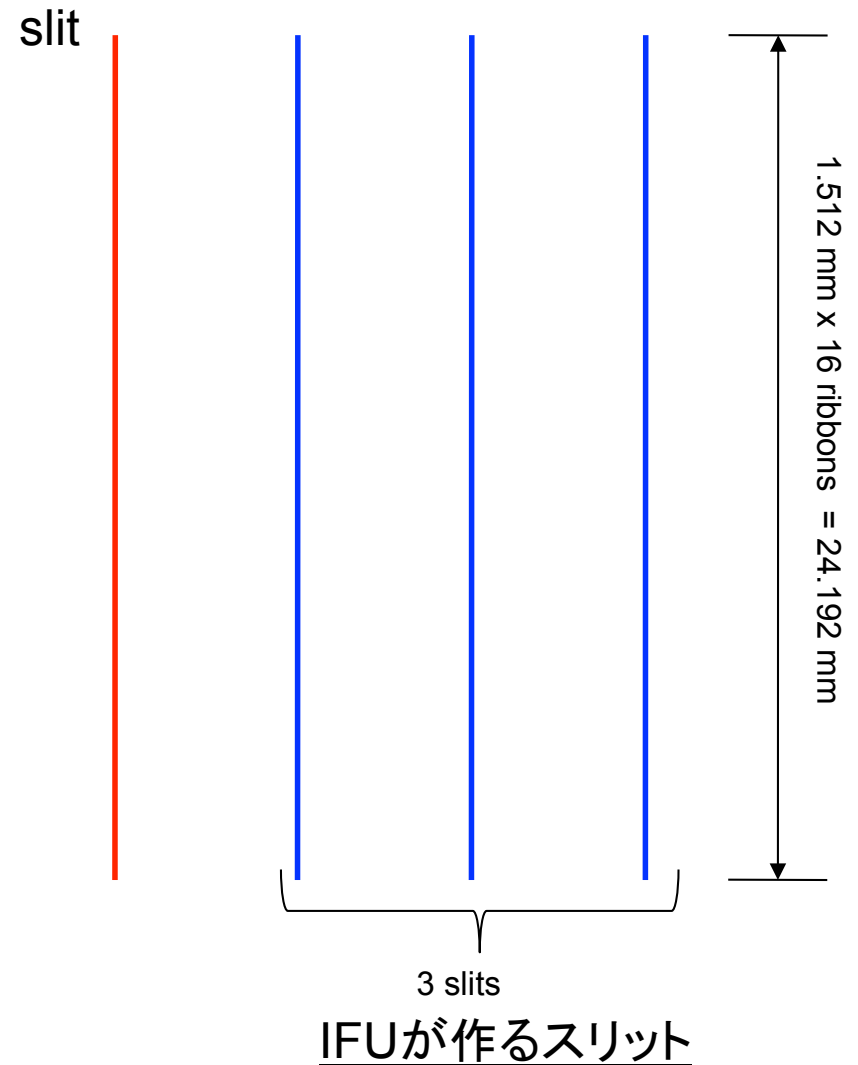


# Configuration of the focal plane

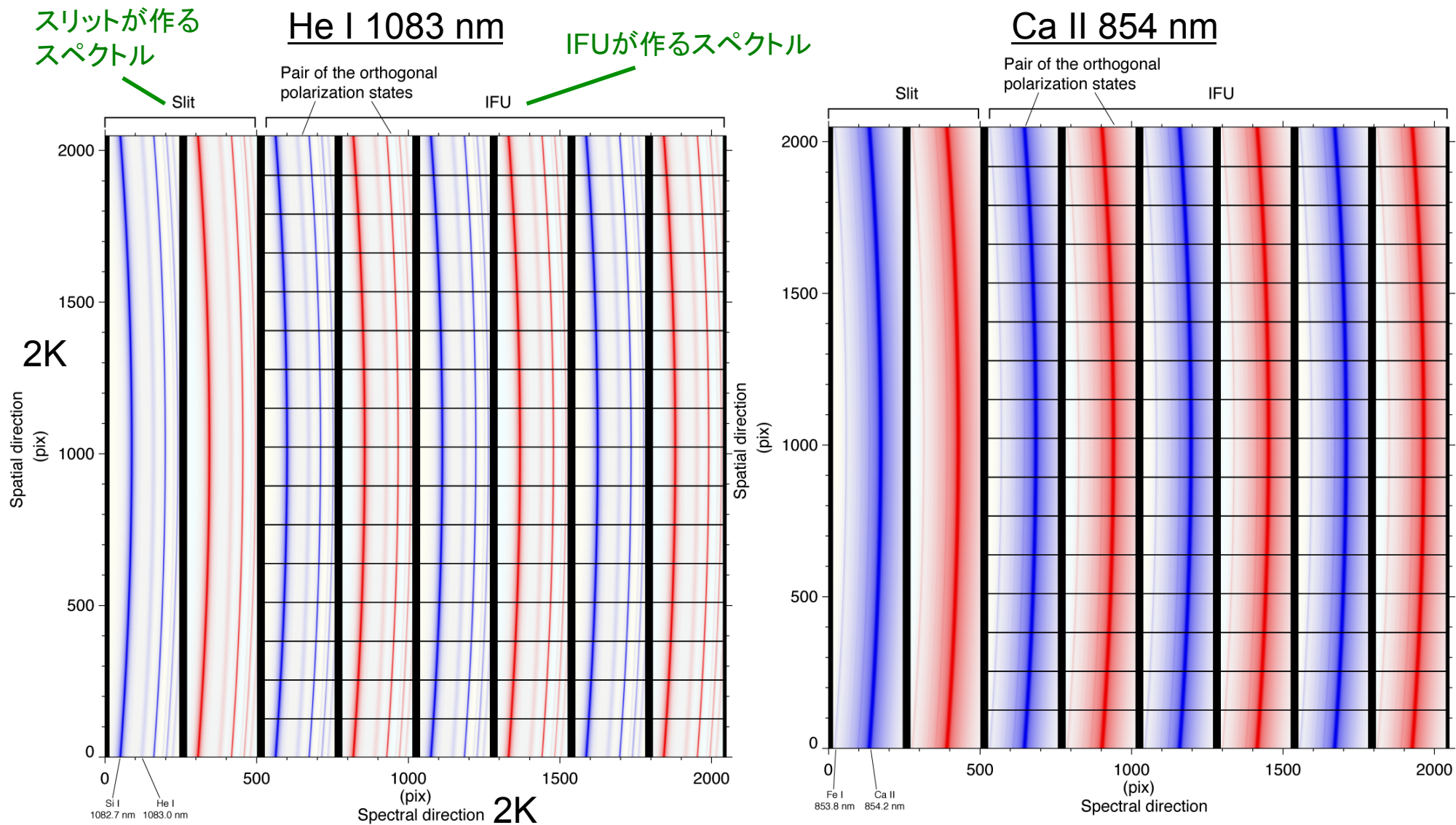
## Entrance of the focal plane



## Exit of the focal plane

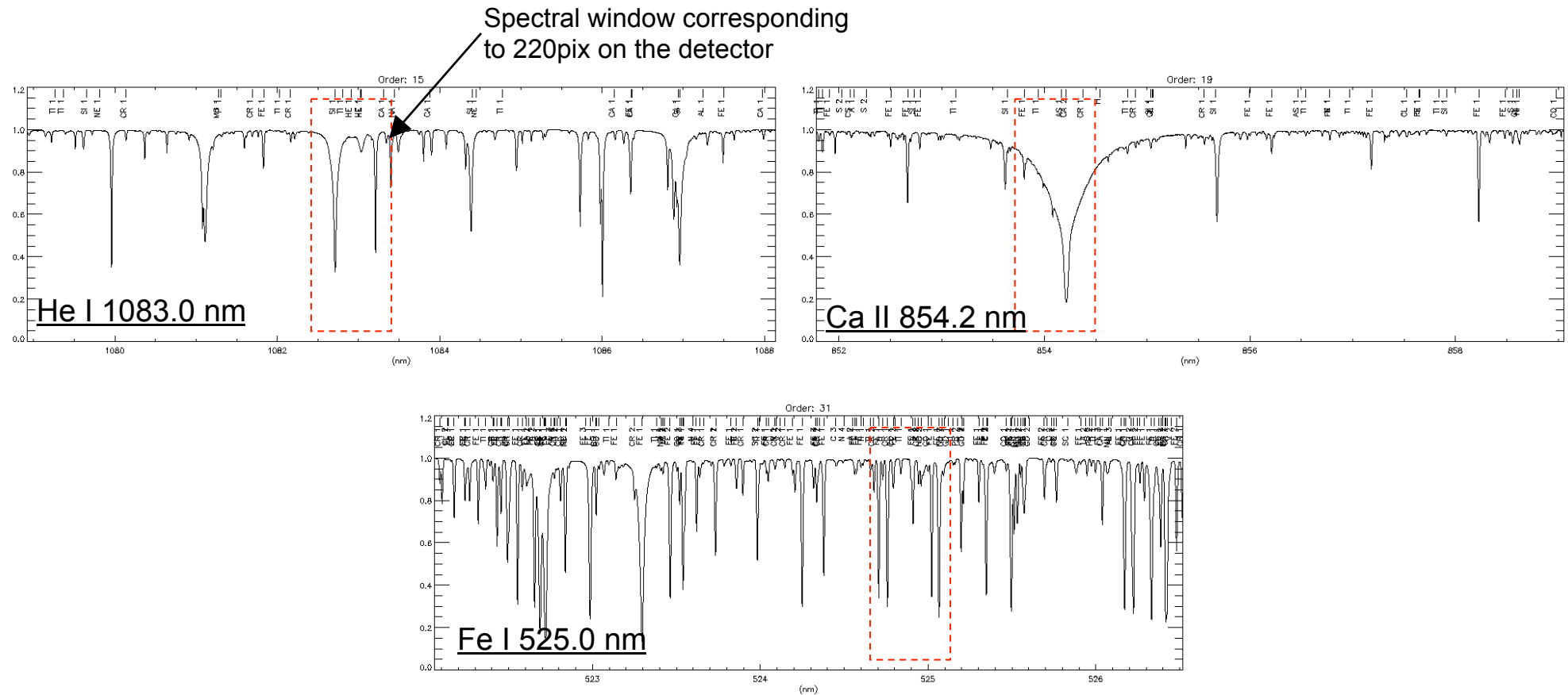


# 偏光分光装置で得られるデータ



Slit & IFU are switched by changing the camera read-out area.

# 偏光分光装置の観測波長範囲

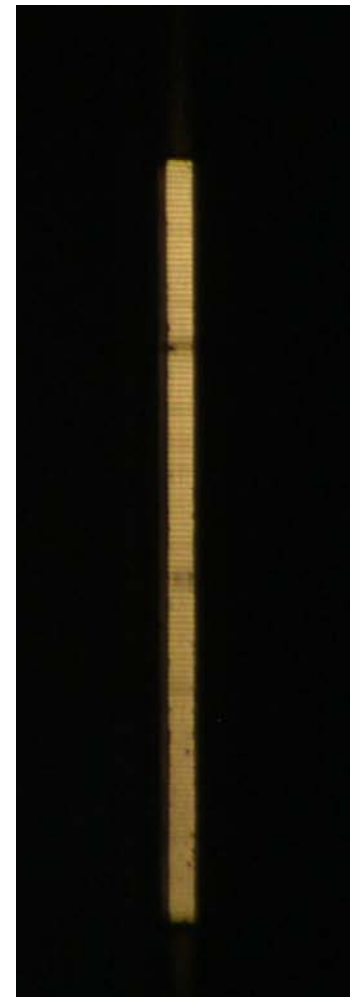


	Sampling	# of pixels	Wavelength range
He I 1083.0 nm	45.2 mÅ	220 pixels	1082.50 – 1083.49 nm (0.99 nm)
Ca II 854.2 nm	35.6 mÅ	220 pixels	853.72 – 854.50 nm (0.78 nm)
Fe I 525.0 nm	21.9 mÅ	220 pixels	524.65 – 525.13 nm (0.48 nm)

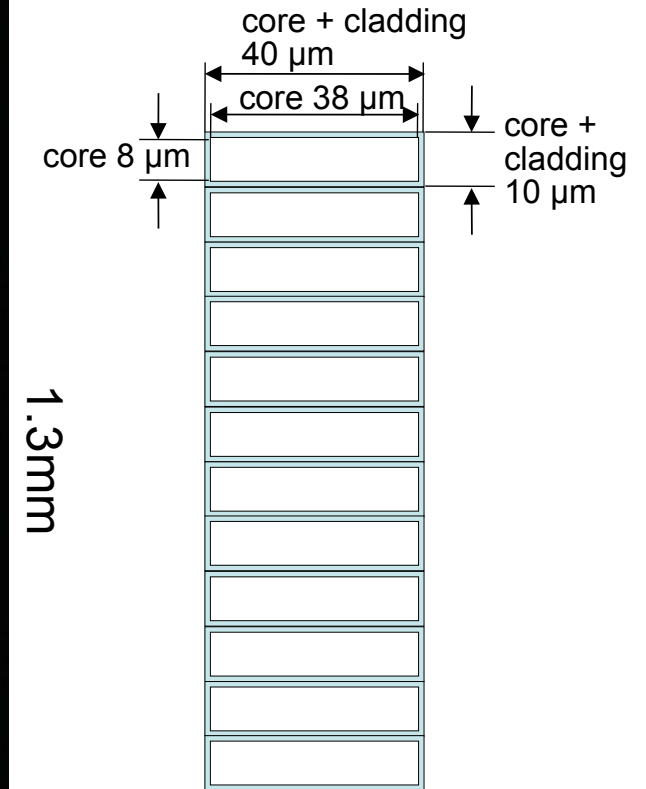
# ファイバーリボンの検証

ハワイ大学(H. Lin)が開発した矩形コアを1次元的に配列させたファイバーリボン(材料はホウケイ酸ガラス)を用いて、面分光装置への応用に必要な以下の項目を検証

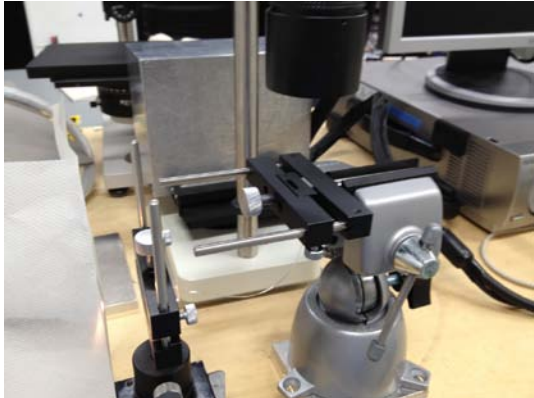
- サイズや配列の精度
  - Does they have enough accuracy for constructing a 2D array?
- 出射光のF値、ビーム分布
  - Critical for the design of the spectrograph
- クロストーク
  - Does the thin cladding work for  $\lambda \sim 1\mu\text{m}$ ?
- 偏光保持
  - Because we have an pol analyzer after the IFU.
- ファイバーの支持方式・筐体
- 放射線耐性



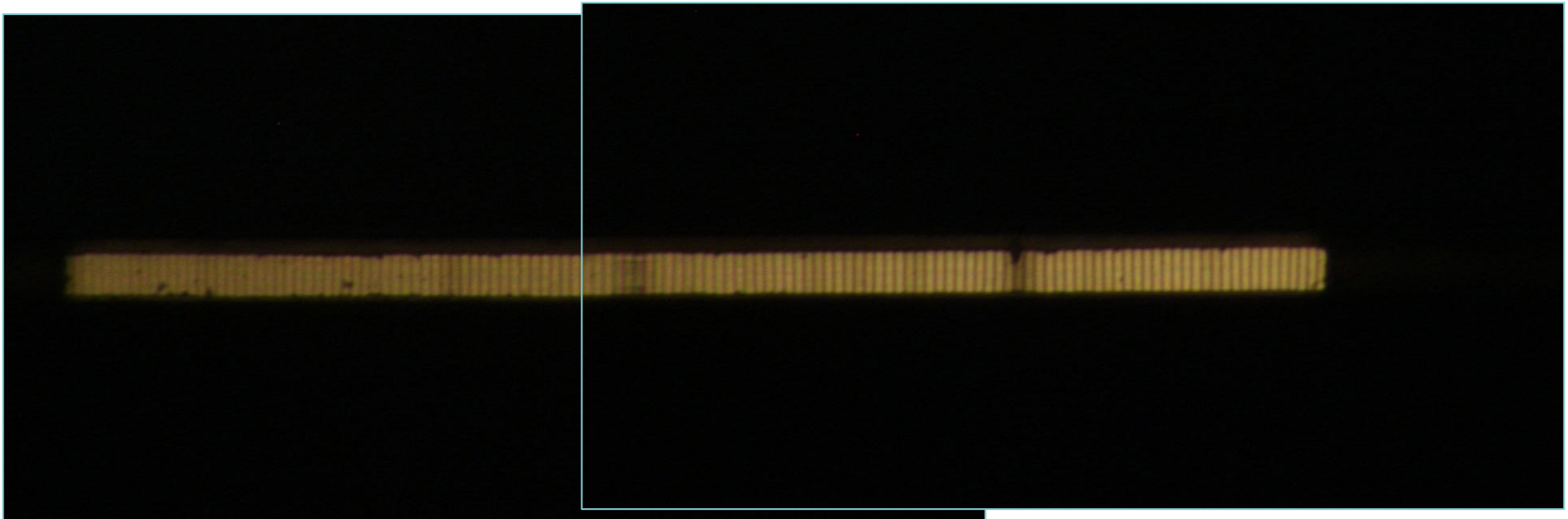
40 $\mu\text{m}$



# 顕微鏡によるファイバーサイズ・配列精度検証



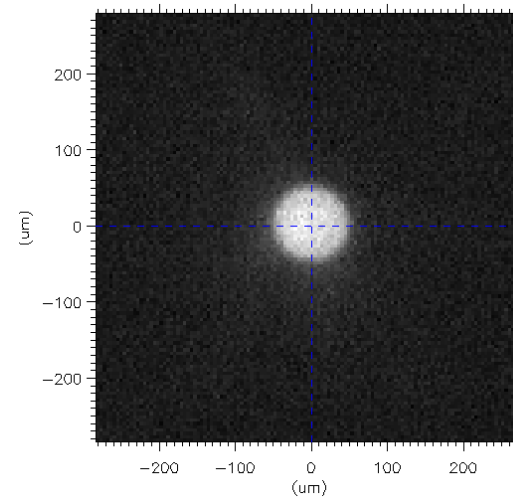
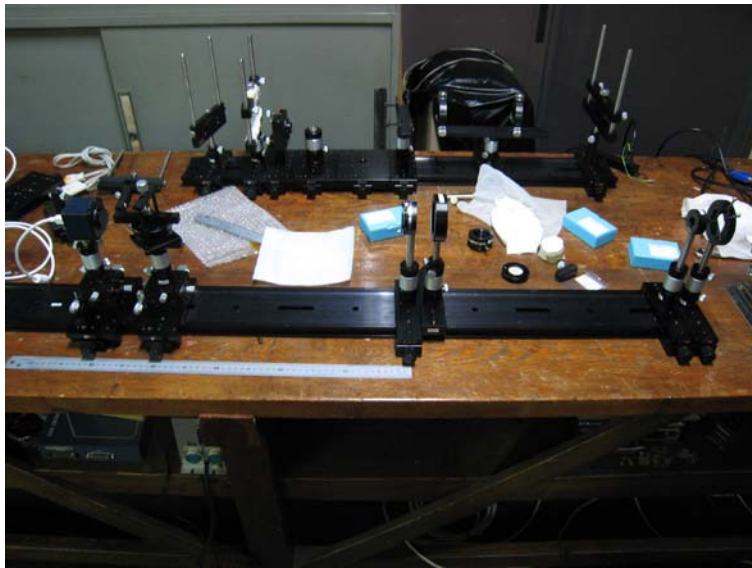
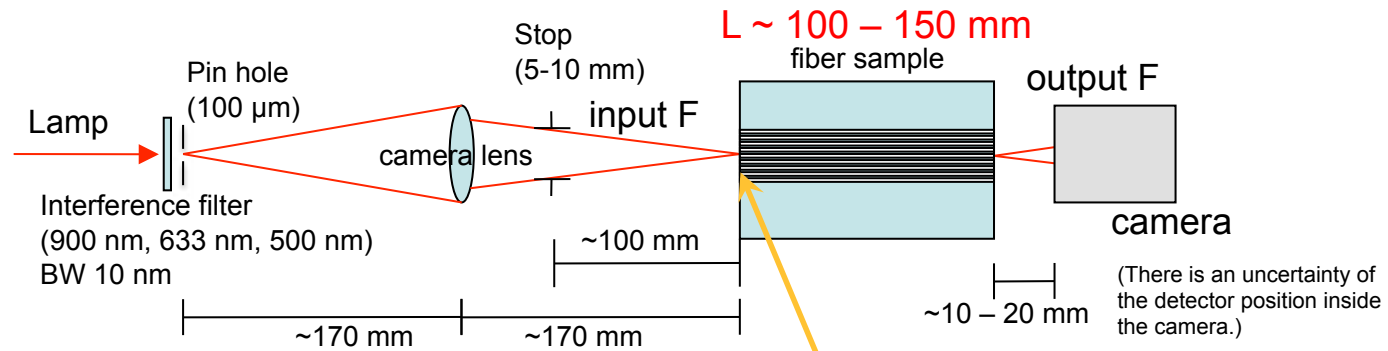
- Accuracy of the size and the alignment of a single fiber ribbon.
  - The size of the elemental fiber is  $10\mu\text{m}\times 43\mu\text{m}$  with less variability.
  - Though there are  $2\text{--}3\ \mu\text{m}$  offsets in the longer direction of the rectangles at some fiber elements, the straightness is well within acceptable level.



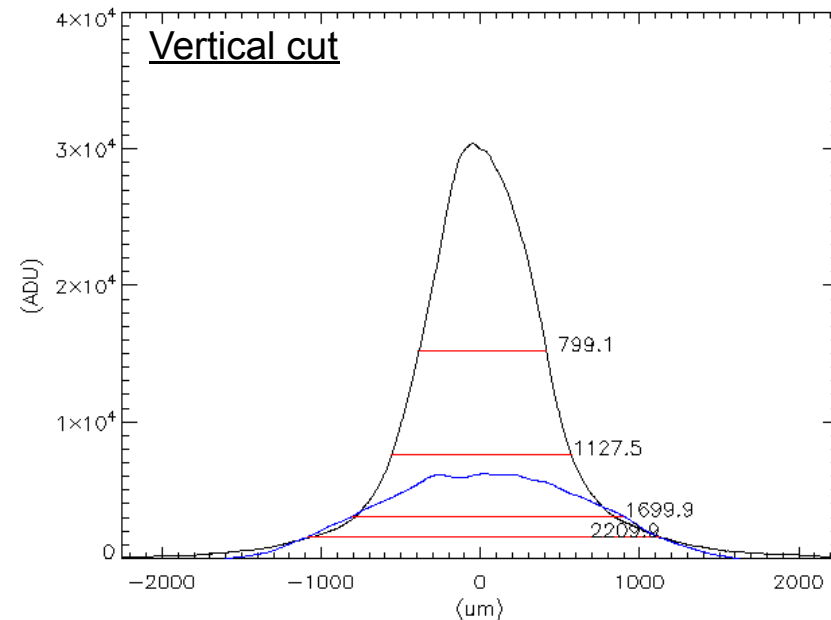
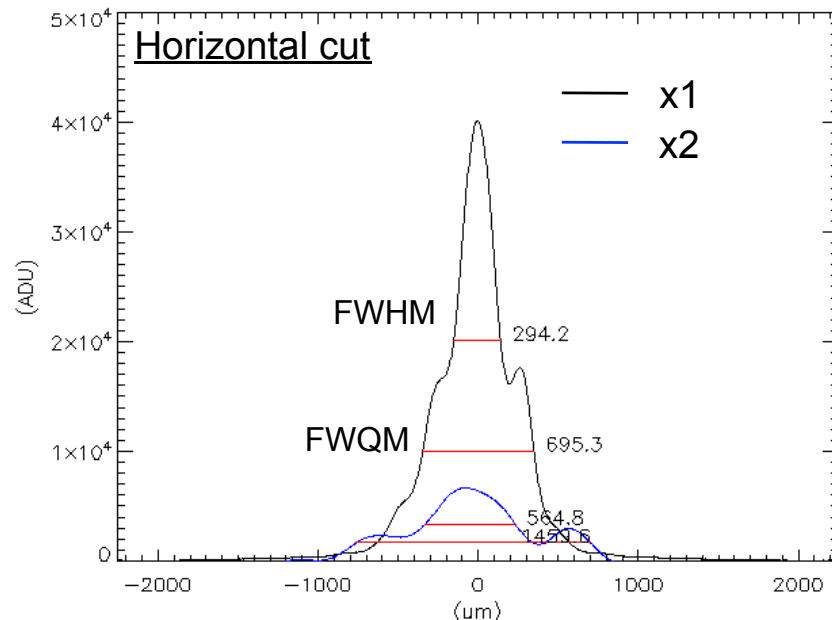
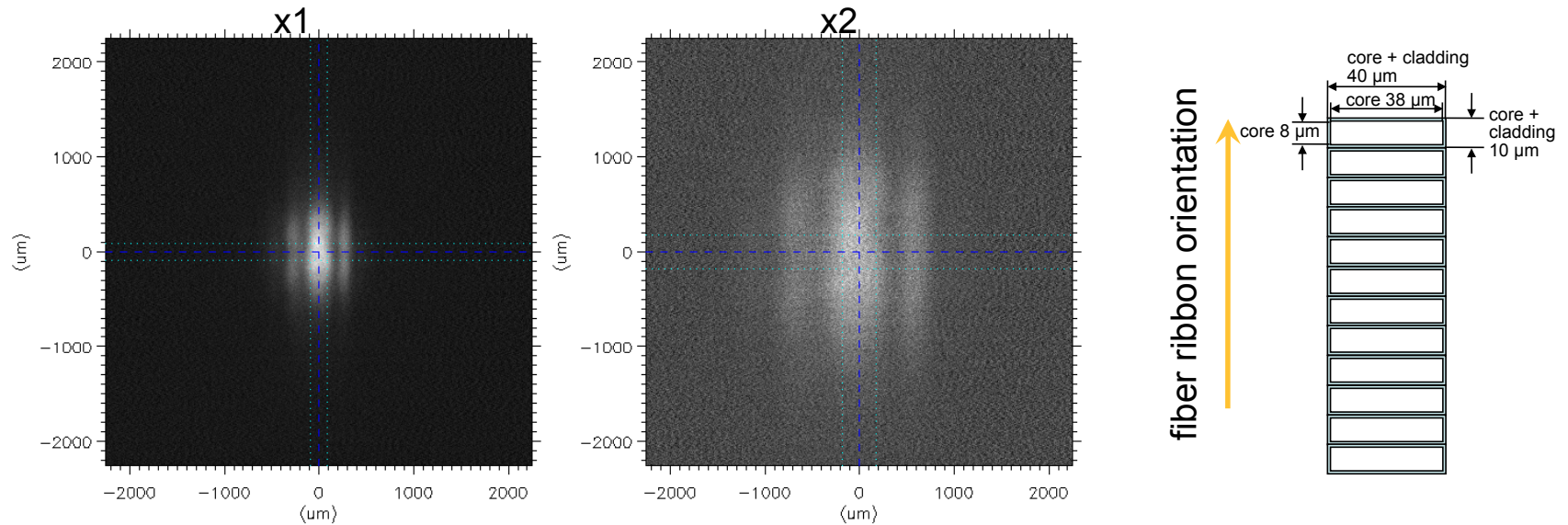
- There are slightly dark portions, but the transmission uniformity is within the acceptable level.



# ファイバー出射光プロファイルの測定

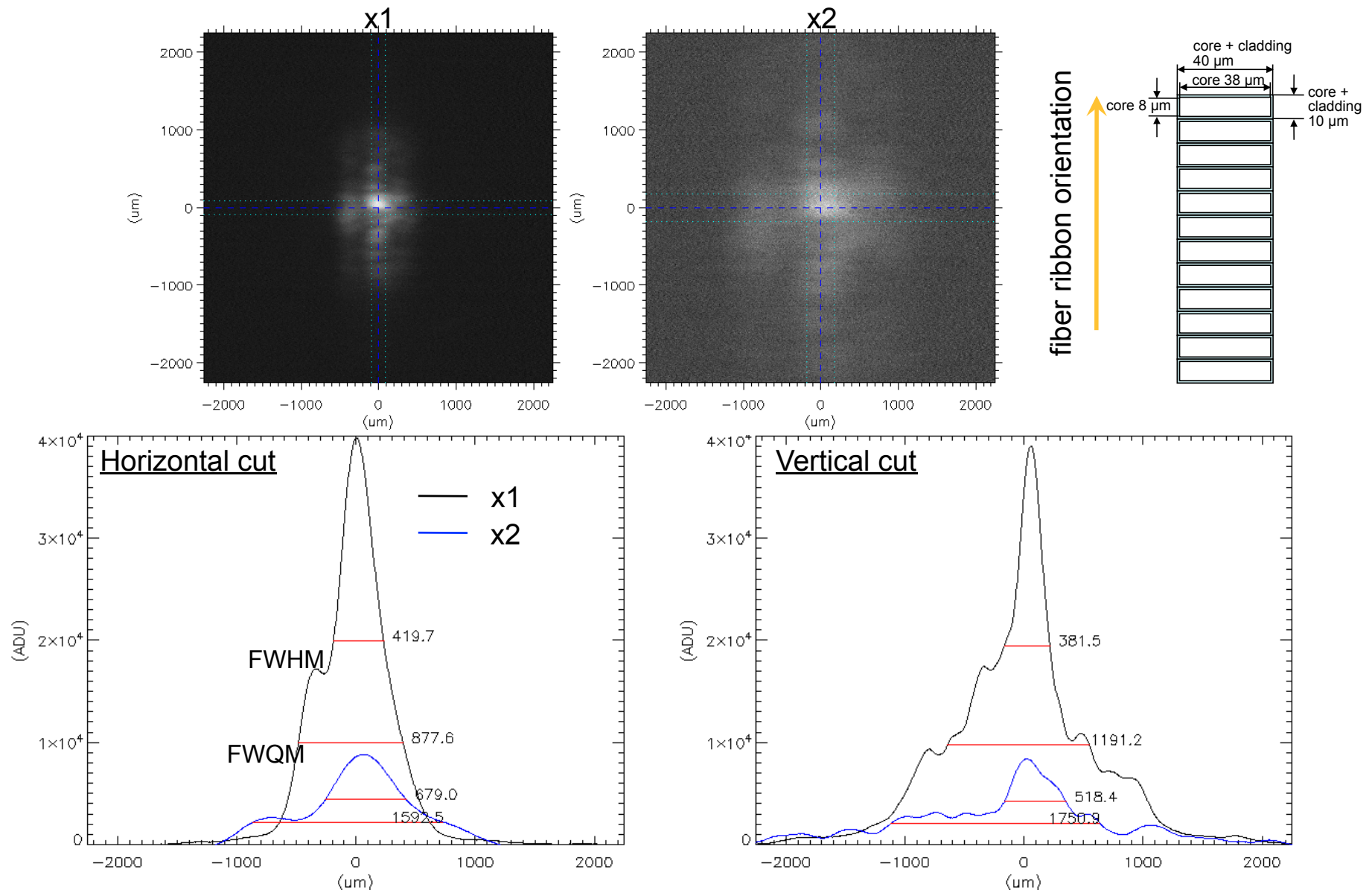


# 出射光プロファイル( $\lambda = 500\text{nm}$ , Input F=20)



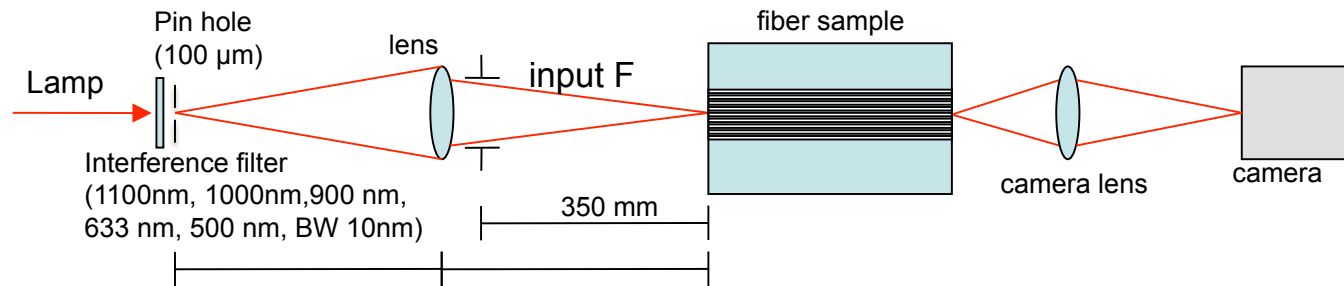
- F~10-20 for the L~100 mm sample and F~ 4-9 for the L~150 mm sample.
- *Vertical stripes (parallel to the ribbon) are clearly seen for the short sample.*

# 出射光プロファイル ( $\lambda = 900\text{nm}$ , Input F=20)

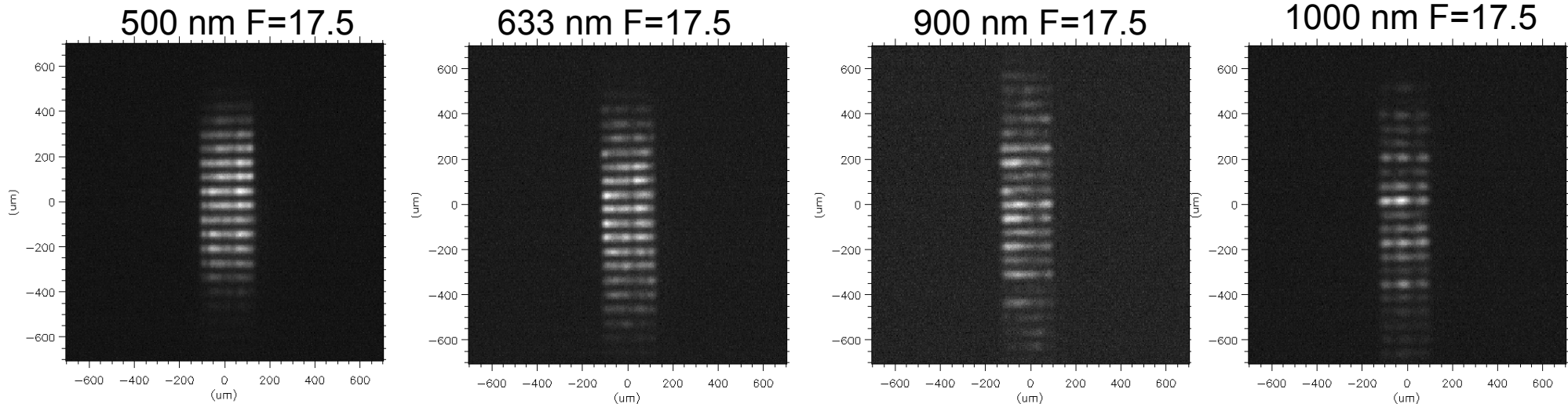


- Not only the vertical stripes but also the horizontal stripes appear at the longer wavelengths.

# ファイバー出口の光量分布



- The camera position is adjusted to have focus at the exit of the fiber ribbon.



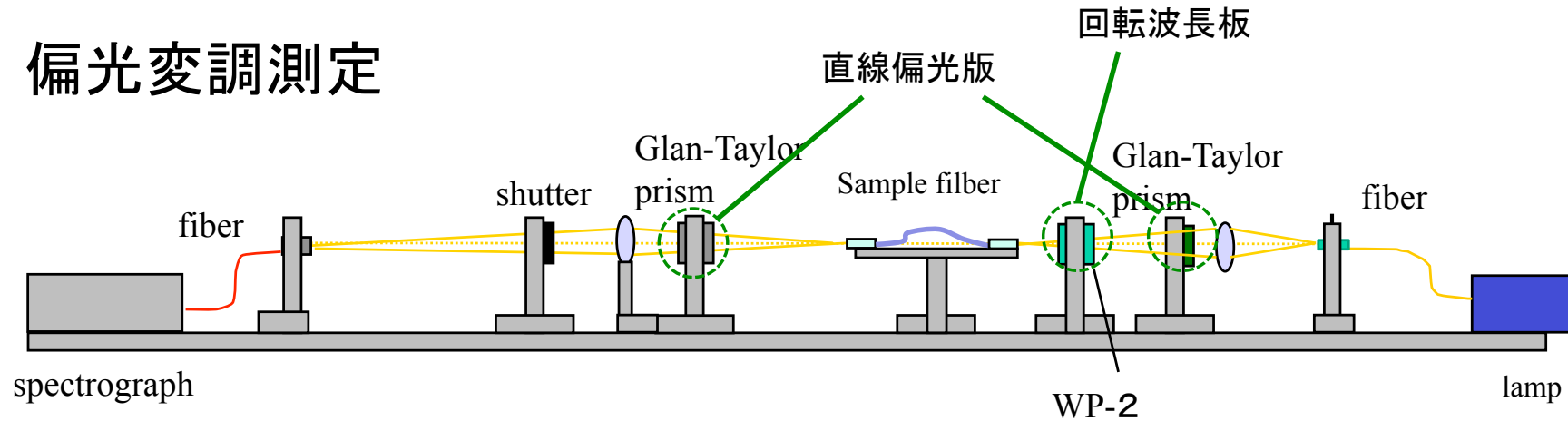
- At the visible wavelengths ( $\lambda \sim 500 - 633$  nm), the cores of the ribbon are uniformly illuminated.
- At the longer wavelengths ( $\lambda \sim 900 - 1100$  nm), the cores are not uniformly illuminated. Some patterns (fringing?) are seen dependent on the wavelength. The patterns at the exit of the fiber are probably related with the vertical stripes.

矩形短軸方向 → シングルモード

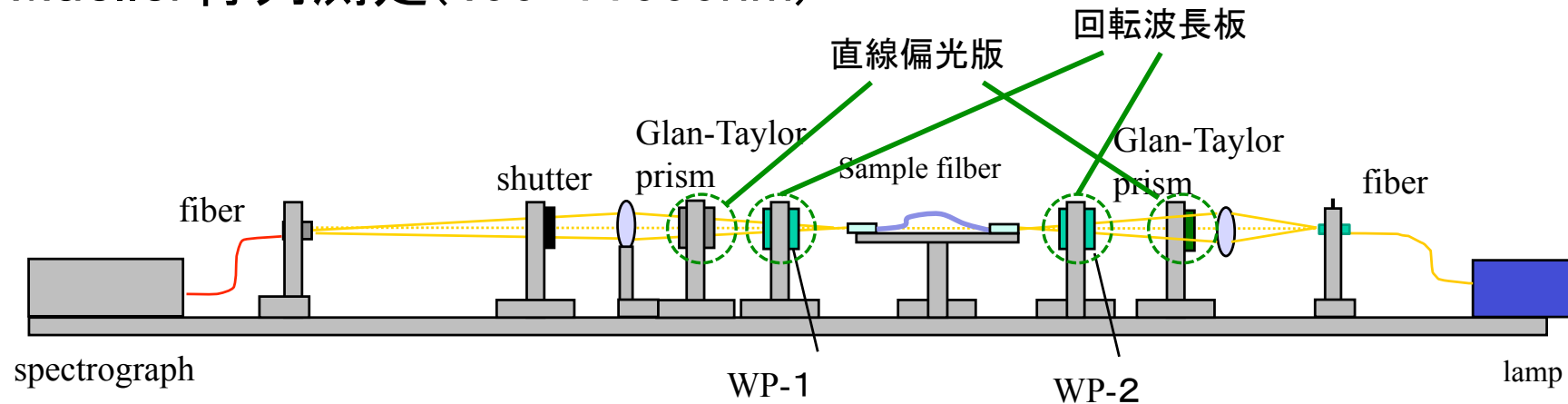
矩形長軸方向 → マルチモード

# 偏光保持性能測定

## 偏光変調測定



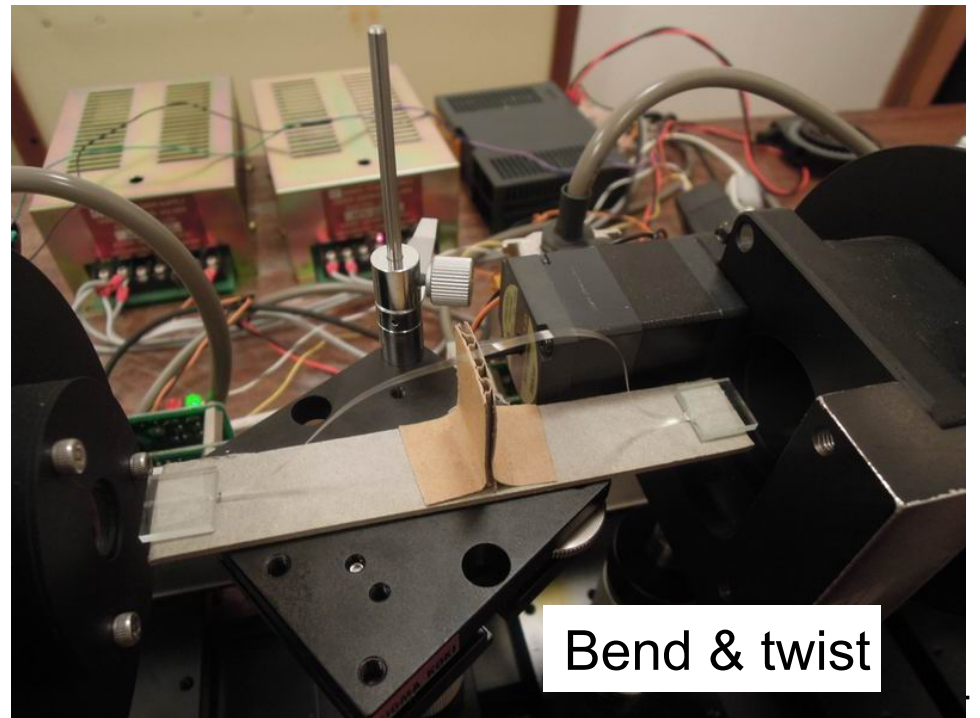
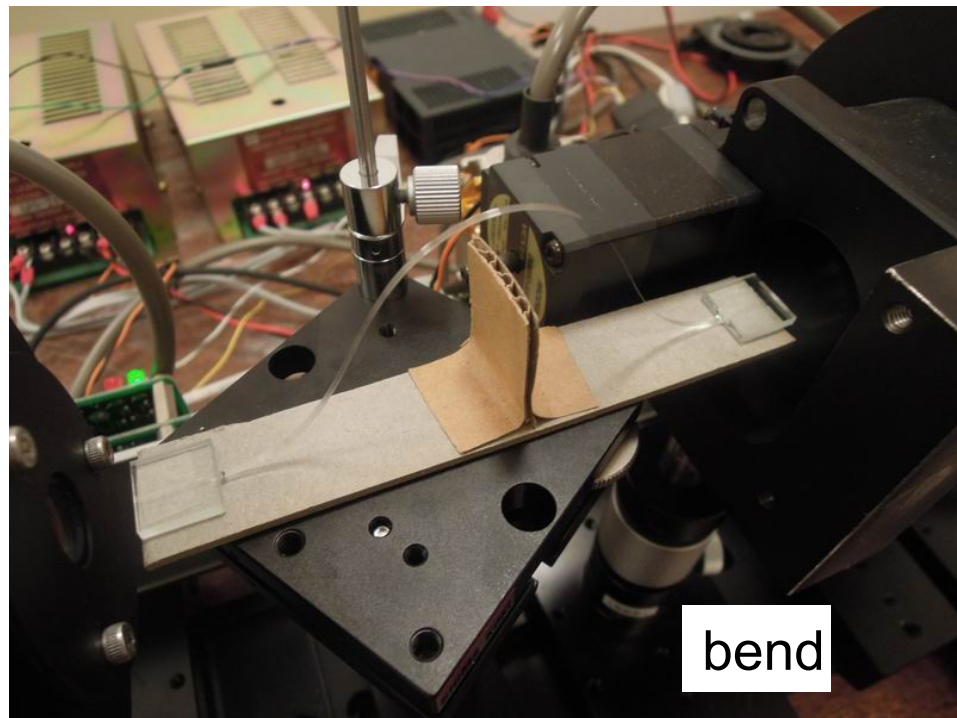
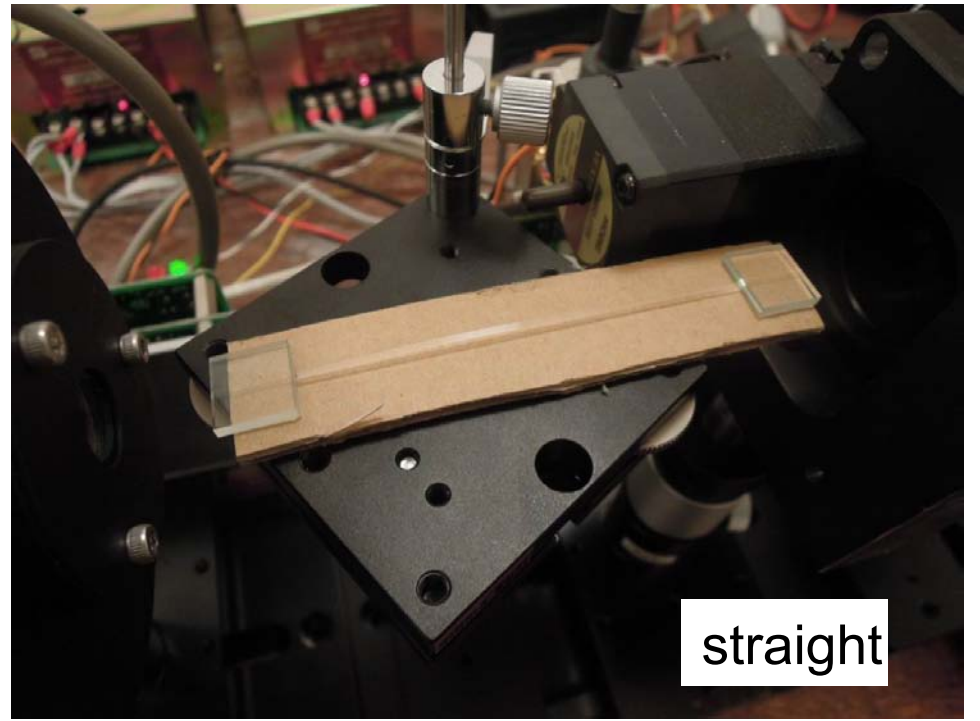
## Mueller行列測定(400-11000nm)



Ocean Photonics  
OP-Maya2000ProHC

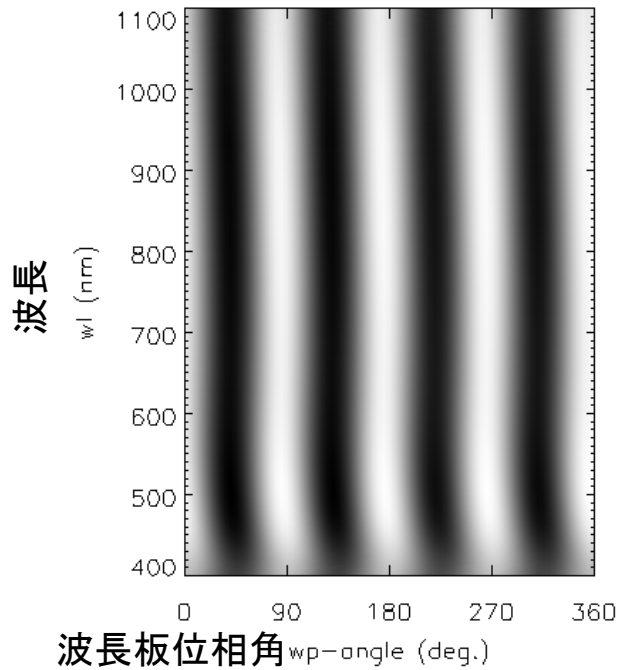
Astropribor, APSAW  
ret ~ 127deg. over 500 – 1100nm



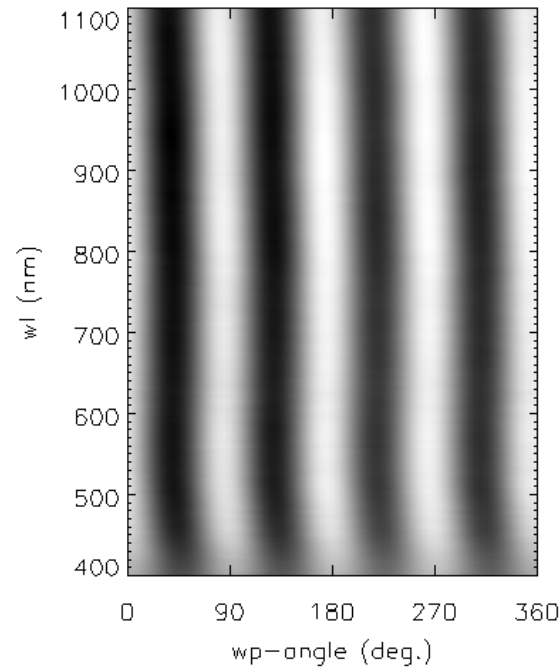


# 偏光変調測定

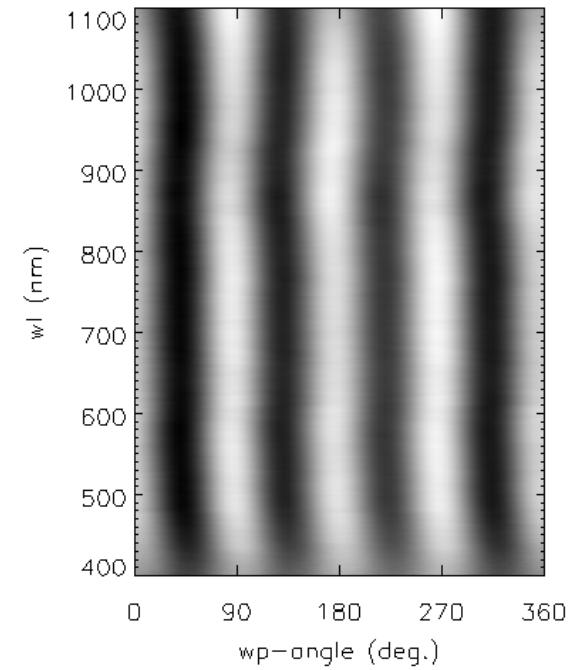
ファイバーが無い場合  
clear



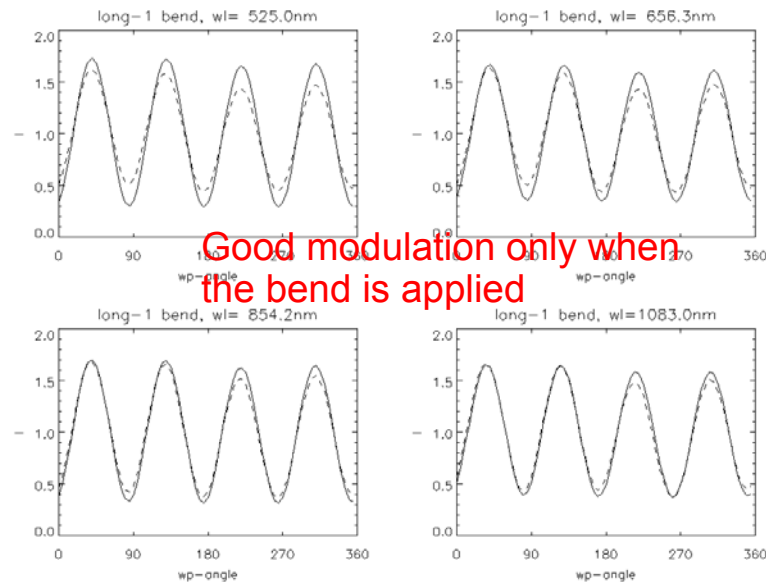
ファイバーを挿入 (Bendのみ)  
long-1 bend



ファイバーを挿入 (bend+twist)  
long-1 bend & twist

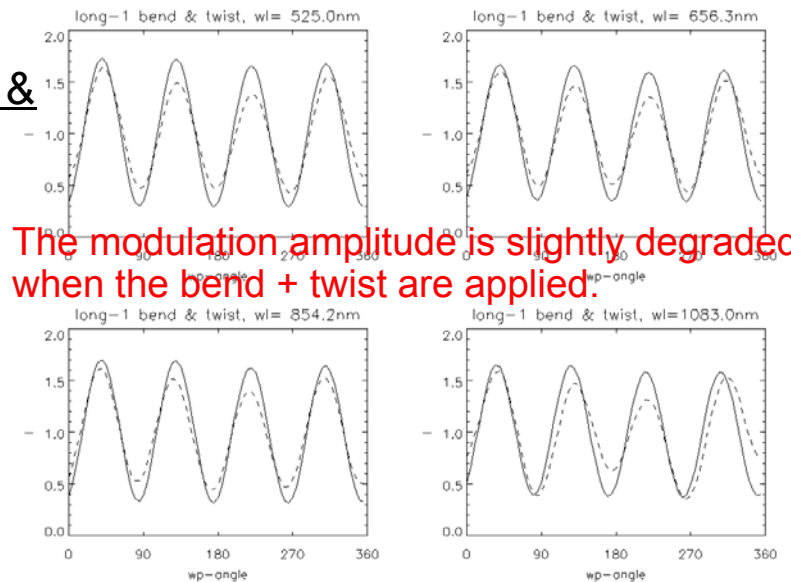


Bend



Good modulation only when the bend is applied

Bend & Twist

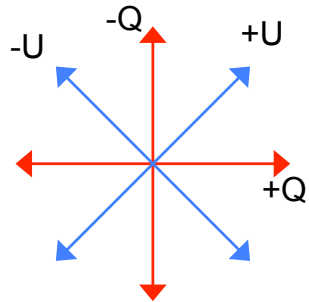
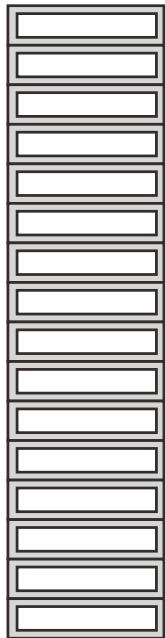


The modulation amplitude is slightly degraded when the bend + twist are applied.

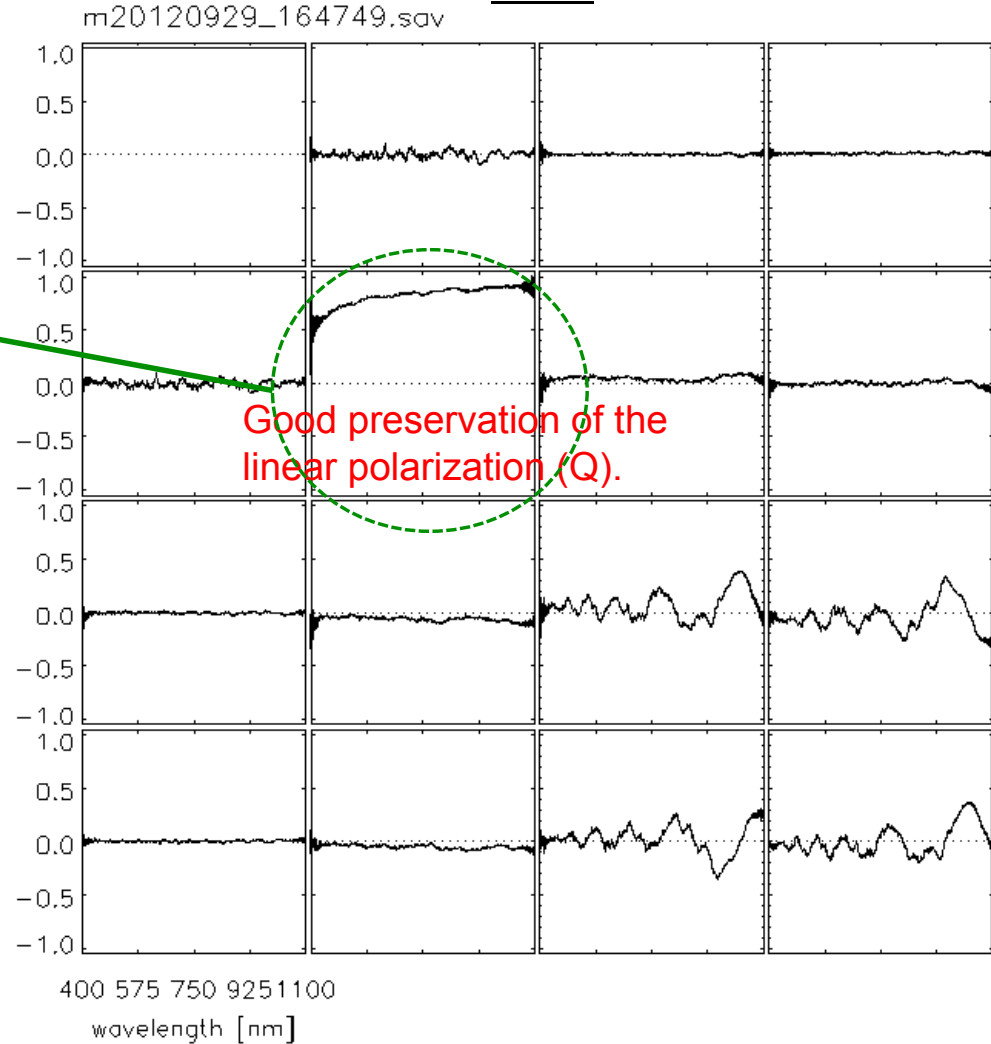
# Mueller行列測定

Ideal Mueller matrix

$$\begin{pmatrix} I_{out} \\ Q_{out} \\ U_{out} \\ V_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & x \\ 0 & 0 & x & x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{in} \\ Q_{in} \\ U_{in} \\ V_{in} \end{pmatrix}$$



Bend



波長

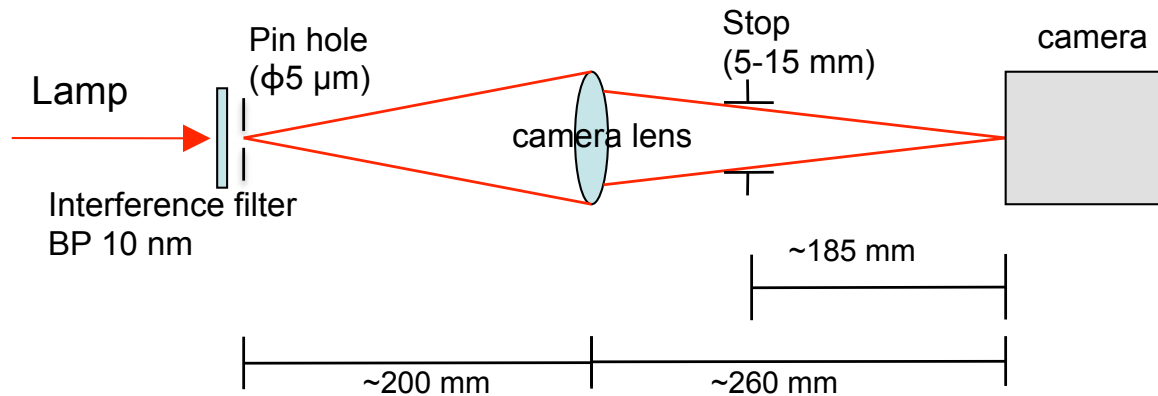


# 観測された振る舞いの定性的な解釈

- 定性的には長方形内を伝播する光の「モードの次数」で解釈できる。
  - 短軸方向はシングルモード
  - 長軸方向はマルチモード
    - 明るさのムラを作っているのは低次のモード
    - **短波長**→高次モードまで多数のモードができる → 長方形内一様に光が伝播
    - **長波長**→モードの数が少ない (シングルモードに近い)→長方形内のムラが大きい
  - ファイバーが長い(あるいは途中に曲げがある)ほどモード間の混合が起きやすく、高次のモードにもエネルギーが行く
- 偏光維持
  - 幾何学的な非等方性で複屈折性を持たせる。
  - 偏光維持に効いているのは低次のモードだろう (高次モードには非等方性が効きにくい)
    - **短波長**→高次モードまで多数のモードができる → 偏光維持性能は悪い
    - **長波長**→低次モードが卓越 → 偏光維持性能はよい
  - この場合、コアサイズを小さくすると、同じ波長でも低次モードが卓越しやすい傾向になるため、偏光維持性能はよくなると推測される。
- モード数が少ない(低次モードが卓越している)場合、光の入れ方、曲げロス、内部の屈折率(透過率)のムラなどの影響を受けやすい(かもしれない)。

# クロストーク(漏れ出し)測定

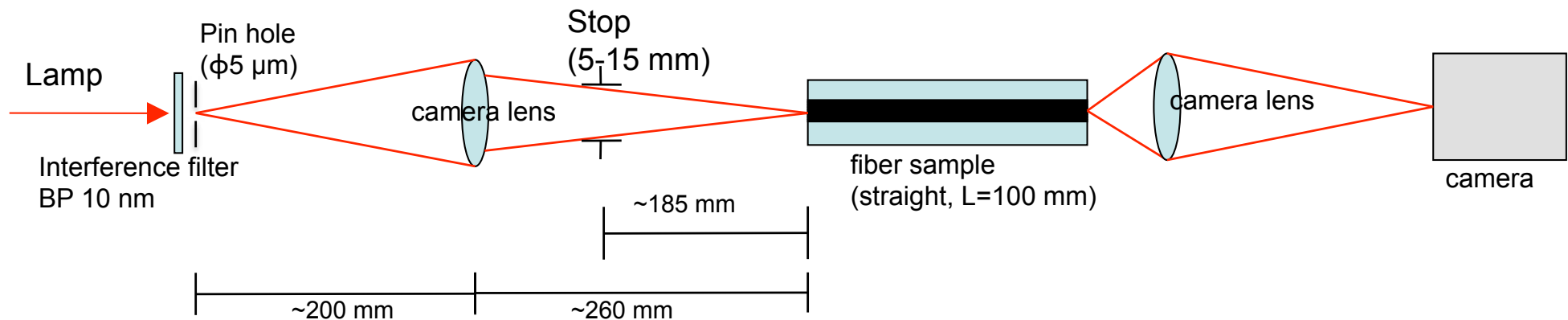
## ファイバーへの入射プロファイル測定



- クラッド厚が薄い( $1\mu\text{m}$ )ため、特に波長が長い場合に光が漏れだすことが懸念された。

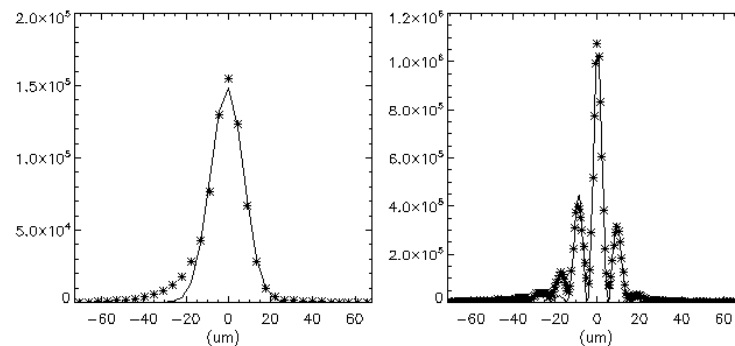
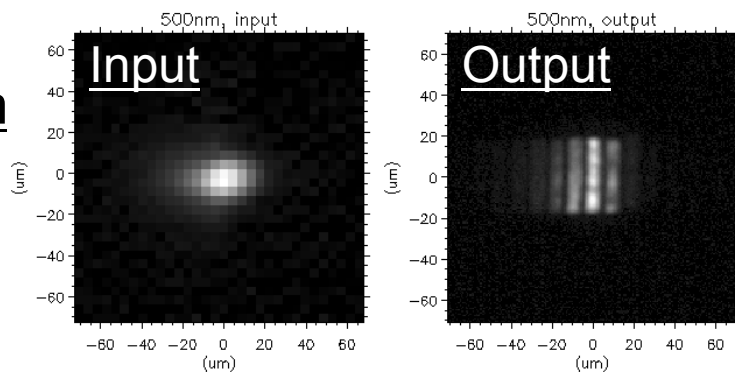
- ファイバーへの入射プロファイルとファイバーからの出射プロファイルを比較することで隣接するファイバーコアに光が漏れ出しているかを測定。

## ファイバーからの出射プロファイル測定



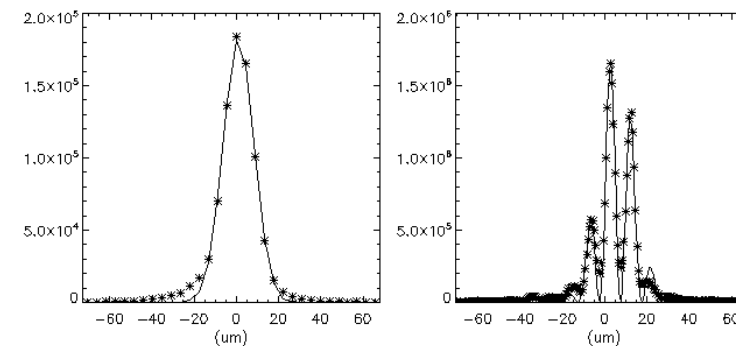
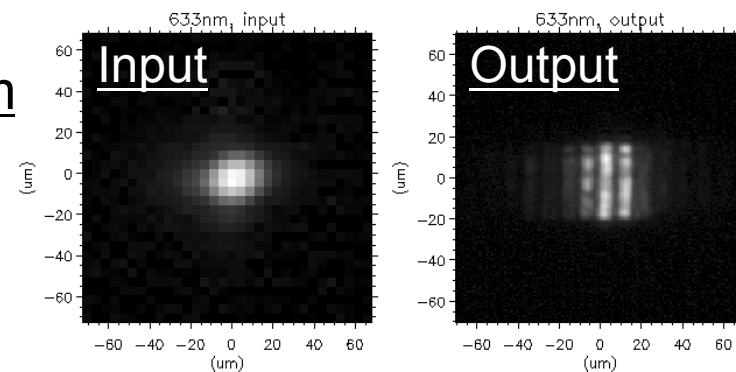
500 nm

(F/18.5)



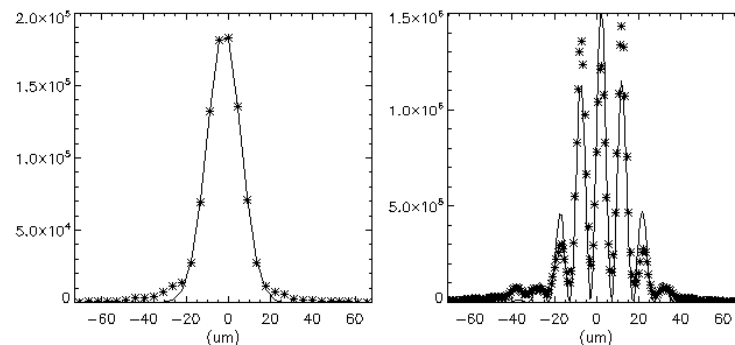
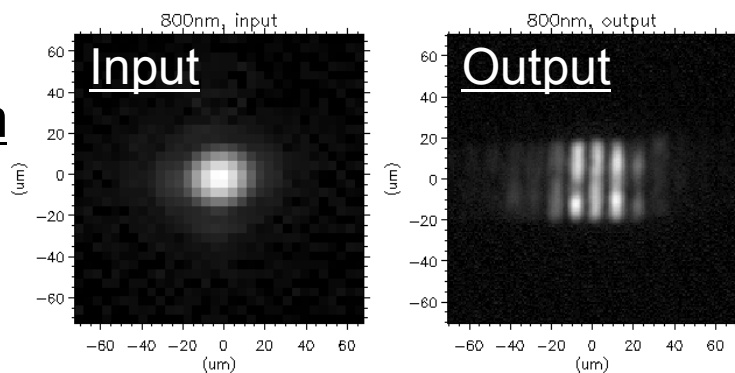
600 nm

(F/18.5)



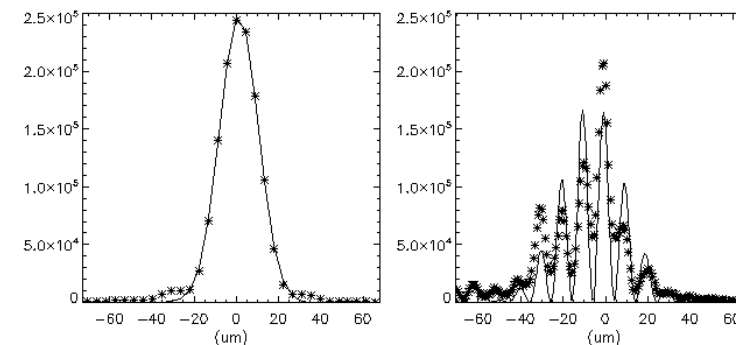
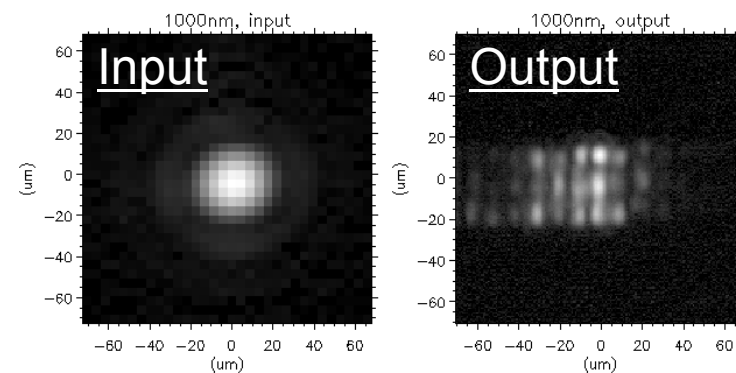
800 nm

(F/18.5)



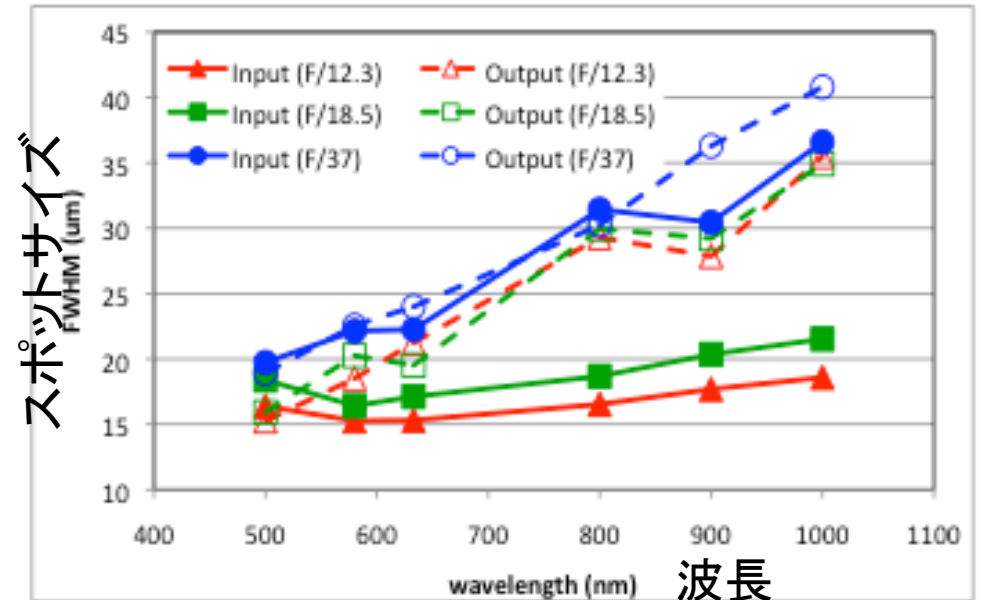
1000nm

(F/18.5)



# クロストーク (漏れ出し) 測定

- The size of the output beam monotonically increases as a function of the wavelength.
  - The degradation of the beam size is not so significant in the visible wavelength range (500 nm, 580 nm, and 633 nm).
  - The degradation becomes significant in the IR wavelength range (800 nm, 900 nm, and 1000 nm), which indicates significant leakage to adjacent fibers (crosstalk) at these wavelengths.
  - When the F-ratio of the incident beam is slow (F>30), the crosstalk becomes small.



Penetration of the Evanescent wave into the cladding

$$E = E_0 \exp(-x/x_g)$$

The penetration depth  $x_g$  can be expressed as below:

$$x_g \cong \frac{1}{n_1 k_0 \sqrt{\sin^2 \theta_c - \sin^2 \theta_m}} = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_1^2 \cos^2 \theta_m - n_2^2}}$$

$$\sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / n_1 = \sqrt{2\Delta}$$

$$k_0 = 2\pi/\lambda$$

# まとめ

- SOLAR-C高精度2次元面偏光分光装置への応用を目指した矩形コアファイバーの特性評価
  - サイズ・配列 → OK
  - 出射光 → F値 (focal ratio degradation)はOK、ただし、明るさのムラについては観測への影響や安定性を検証する必要がある
  - 偏光保持 → bendだけならOK。エポキシ樹脂で固定した場合の影響評価
  - クロストーク → 波長1  $\mu\text{m}$ でNG。クラッドを厚くするなどして対応

- 今後の予定

- ファイバーリボンをエポキシ樹脂で固定した実験機による特性評価  
(曲げによる出射光プロファイルの変化、エポキシ固化応力が偏光保持に与える影響)
- 空間分解能・波長分解能達成のため、矩形コアの小型化 (40  $\mu\text{m}$  → 30  $\mu\text{m}$ )  
クロストークの低減

