

スナップショット型 フルストークス偏光カメラ

理化学研究所

光量子工学研究センター アト秒科学研究チーム

沖野 友哉

従来技術とその問題点 (本技術開発の背景)

- 商用のスナップショット型偏光カメラでは、計測対象画像の**円偏光度（ストークスパラメータ S_3 ）**を計測できない。
- 物理的に偏光板等を回転しながら複数回の撮像を行う、フルストークスカメラがあるが、**短時間**に（偏光板を回転している時間内に）円偏光度が変化するような場合には利用できない。

ストークスパラメーターとは

光の偏光状態を記述する

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_{RCP} - I_{LCP} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{array}{l} \text{直線偏光度 (DoLP)} \\ \text{直線偏光角度 (AoLP)} \\ \text{円偏光度 (DoCP)} \end{array}$$

- 厳密には、 $S = S(\lambda)$ とストークスパラメーターは波長 λ 依存
- 波長分布まで計測するとなるとシステムが複雑となるため、単一波長を予め選択

用途：反射除去（➡自動運転用途）、応力・歪み検出、異物混入検査
（通常のカメラでは得られない付加価値の高い情報）

フルストークスカメラの用途例

偏光コントラストを用いた画像コントラストの改善

N.T. Clancy *et al.*, *Biomed. Opt. Exp.* **5**, 4108 (2014).

手術時のIn-vivo計測

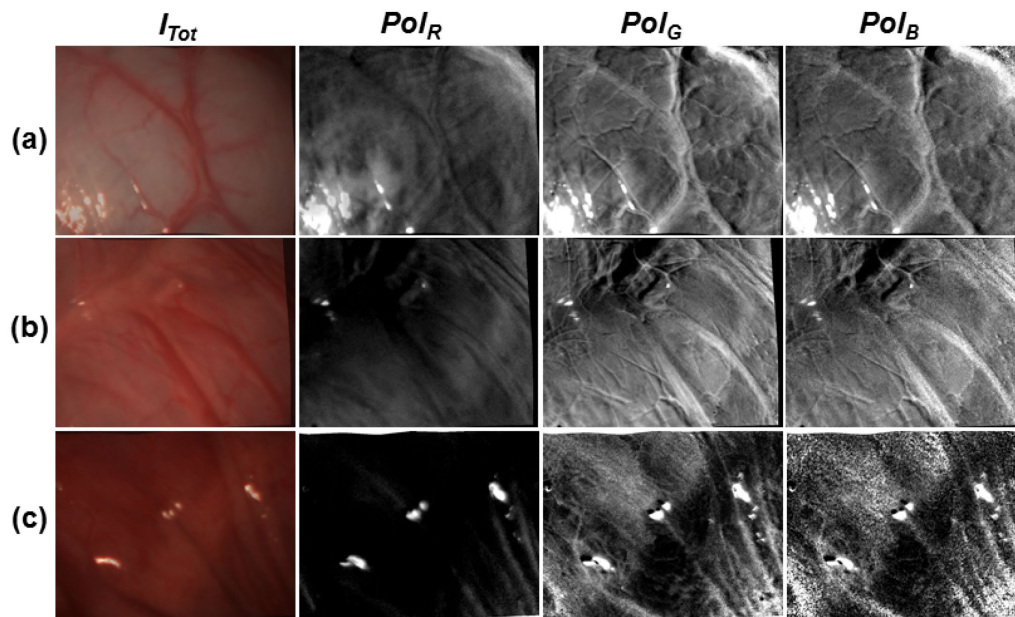
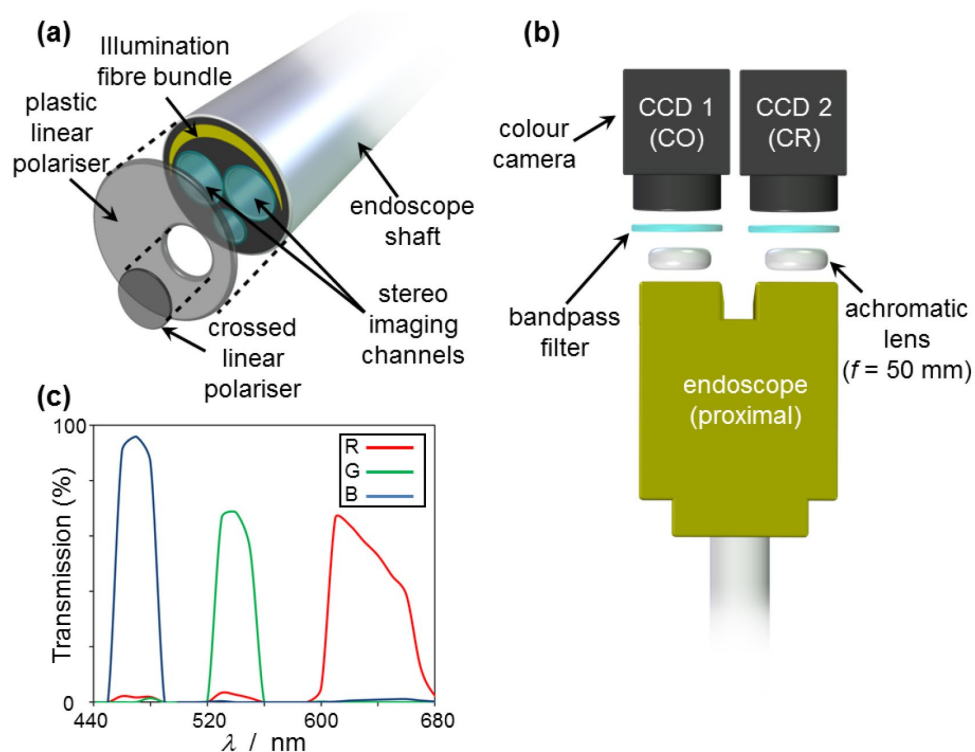


Fig. 5. *Pol* images of porcine tissue in the red (R), green (G) and blue (B) wavebands along with the corresponding total intensity (I_{Tot}) colour image. The data show varying contrast with wavelength in (a) bladder, (b) large intestine, and (c) small intestine.

(a) 膀胱, (b) 大腸, (c) 小腸

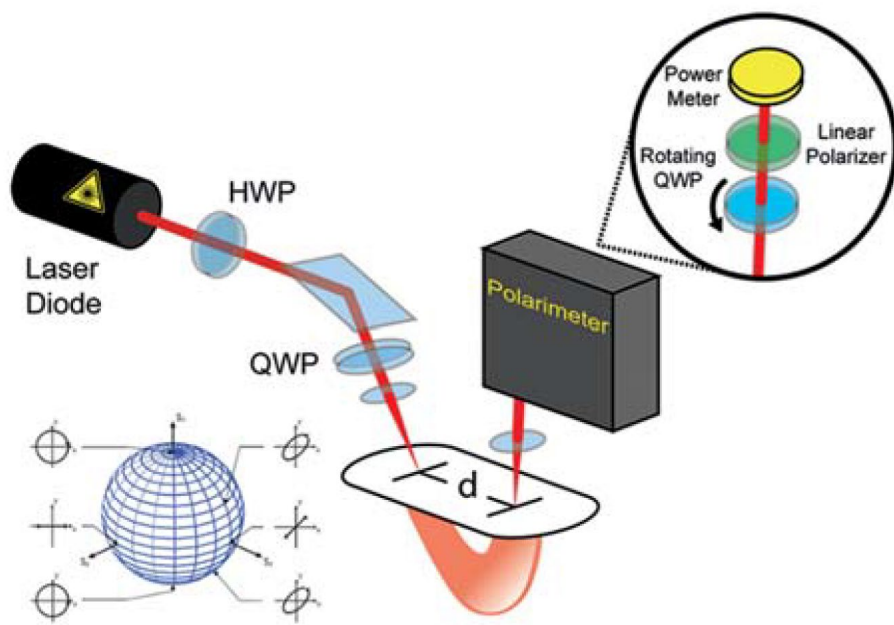
短時間かつ高空間分解能での計測が必要

フルストークスカメラの用途例

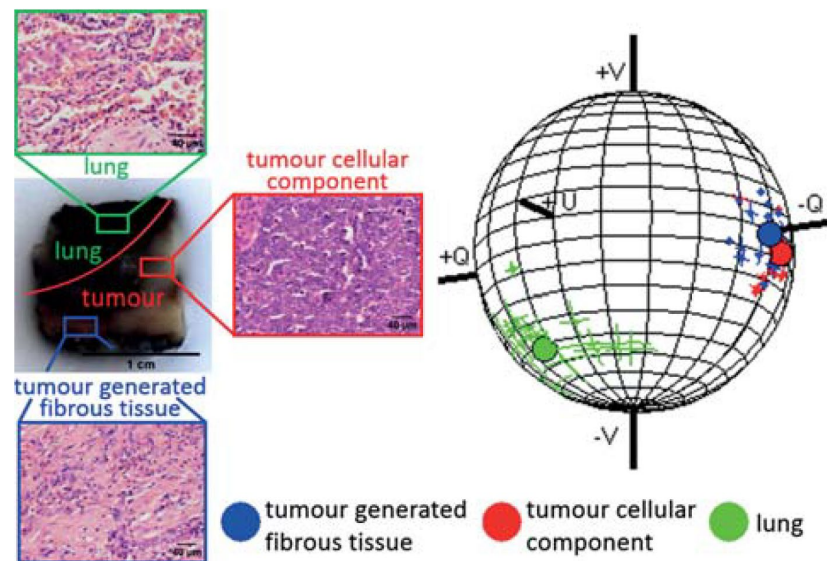
生体組織の医学診断

B. Kunnen *et al.*, *J. Biophotonics* **8**, 317 (2015).

正常な生体組織と異常な生体組織
異なるストークスパラメーターの分布



ポアンカレ球
(ストークスパラメーターの分布)

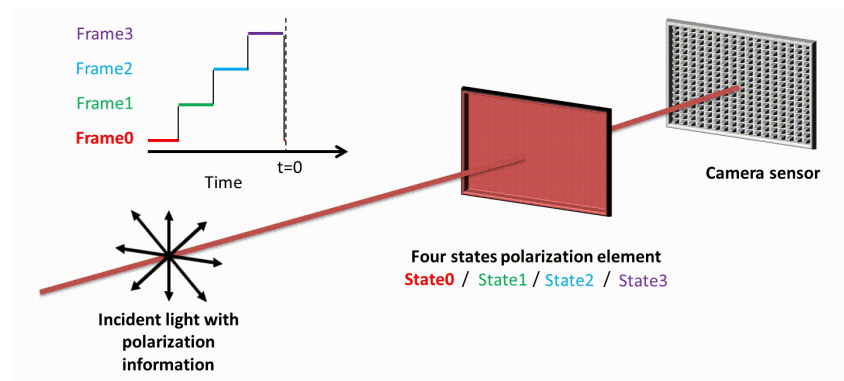


$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}$$

フルストークス偏光カメラ①

時分割型 : Division of Time (DoT)

- 複数回計測
- 非スナップショット
- 偏光状態が高速に変化する場合には利用できない
- 唯一市販化されているフルストークスカメラ
(SALSA, BOSSA NOVA VISION)



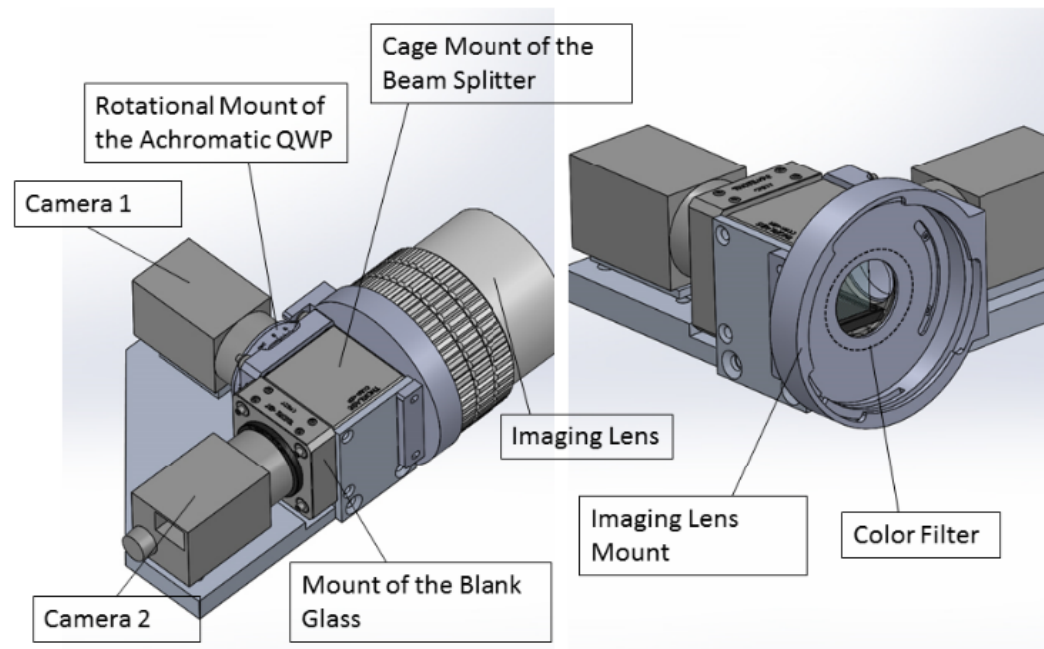
(80 mm x 80 mm x 100 mm)

50ミリ秒程度は偏光状態が変化しないことが必要

フルストークス偏光カメラ②

振幅分割型 : Division of Amplitude (DoA)

- 2台のカメラを利用
- **スナップショット計測が可能**
- カメラの位置・倍率の高精度調整要
(サブピクセル精度が必要)
- 2台のカメラの個体差のキャリブレーション要

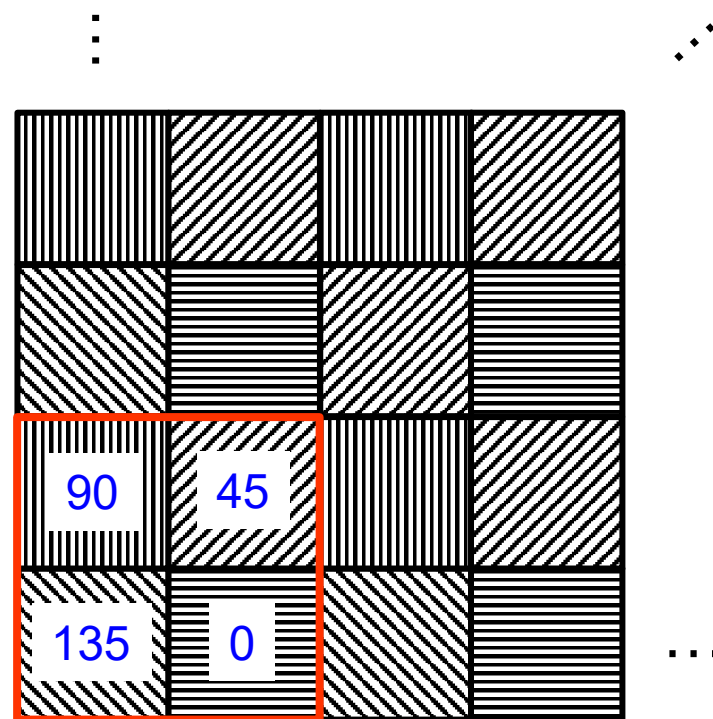


X. Tu *et al.*, *Opt. Exp* **25**, 33160
(2017).
(アリゾナ大学+4D Technology Corp.)

スナップショット型 リニアストークスカメラ

CMOSイメージセンサー
+
4方位ワイヤグリッド偏光子アレイ
(例：ソニー社IMX250MZR)

- CMOSイメージセンサーの性能を継承
- 高空間分解能
(ピクセルサイズ：3.45 μ m, 画素数5MP)
- 高消光比 (250:1)
- 直線偏光に関するストークスパラメーター (S_0 , S_1 , S_2)の計測
- 商用スナップショット型偏光カメラは、**円偏光度 (S_3)**を計測できない。



リニアストークスカメラ からフルストークスカメラへ

- リニアストークス : S_0, S_1, S_2 : 最小計測数 3
- フルストークス : S_0, S_1, S_2, S_3 : 最小計測数 4

S_0, S_1, S_2 の計測であれば、3画素で十分

偏光解析単位画素 : $2 \times 2 = 4$ 画素

(ただし独立画素数は3)

$$I_0 + I_{90} = I_{45} + I_{135}$$

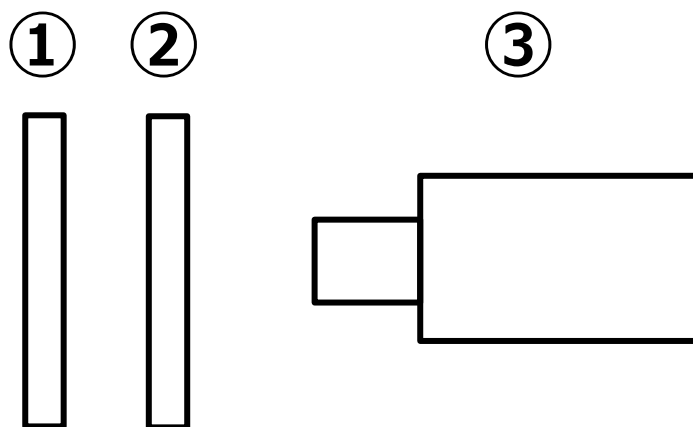
S_0, S_1, S_2, S_3 を計測するには、冗長画素を有効に活用することはできないか (本技術の発想の原点)

開発装置の構成

極めてシンプルかつ低価格な装置構成

- ① 狭帯域バンドパスフィルタ
- ② 複屈折ウェッジ
- ③ スナップショット型偏光カメラ（市販）

（市販の偏光カメラ③に①、②を追加するのみ）



本技術の元となるアイデア

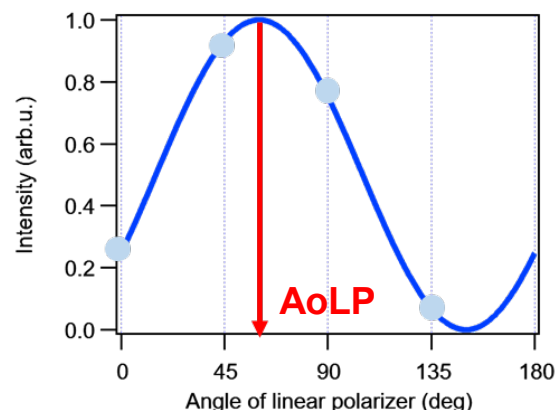
スナップショット型リニアストークスカメラの冗長性を解消する

1. リニアストークス計測

- 偏光解析単位画素：2x2
(単位画素の範囲で均一な照明が必要)
- 最小計測: 3 $\Rightarrow S_0, S_1, S_2$

拘束条件 $I_0 + I_{90} = I_{45} + I_{135}$

$\Rightarrow$ 4画素は必要なく、1画素は余計！



偏光解析単位画素

90	45	90	45	90
135	0	135	0	135
90	45	90	45	90
135	0	135	0	135
90	45	90	45	90

2. フルストークス計測

- 最小計測：4 $\Rightarrow S_0, S_1, S_2, S_3$

拘束条件 $I_0 + I_{90} = I_{45} + I_{135} = I_{LCP} + I_{RCP}$

- 開発装置の偏光解析単位画素: 3x3
- 単位画素 (3x3) の範囲で均一な照明が必要

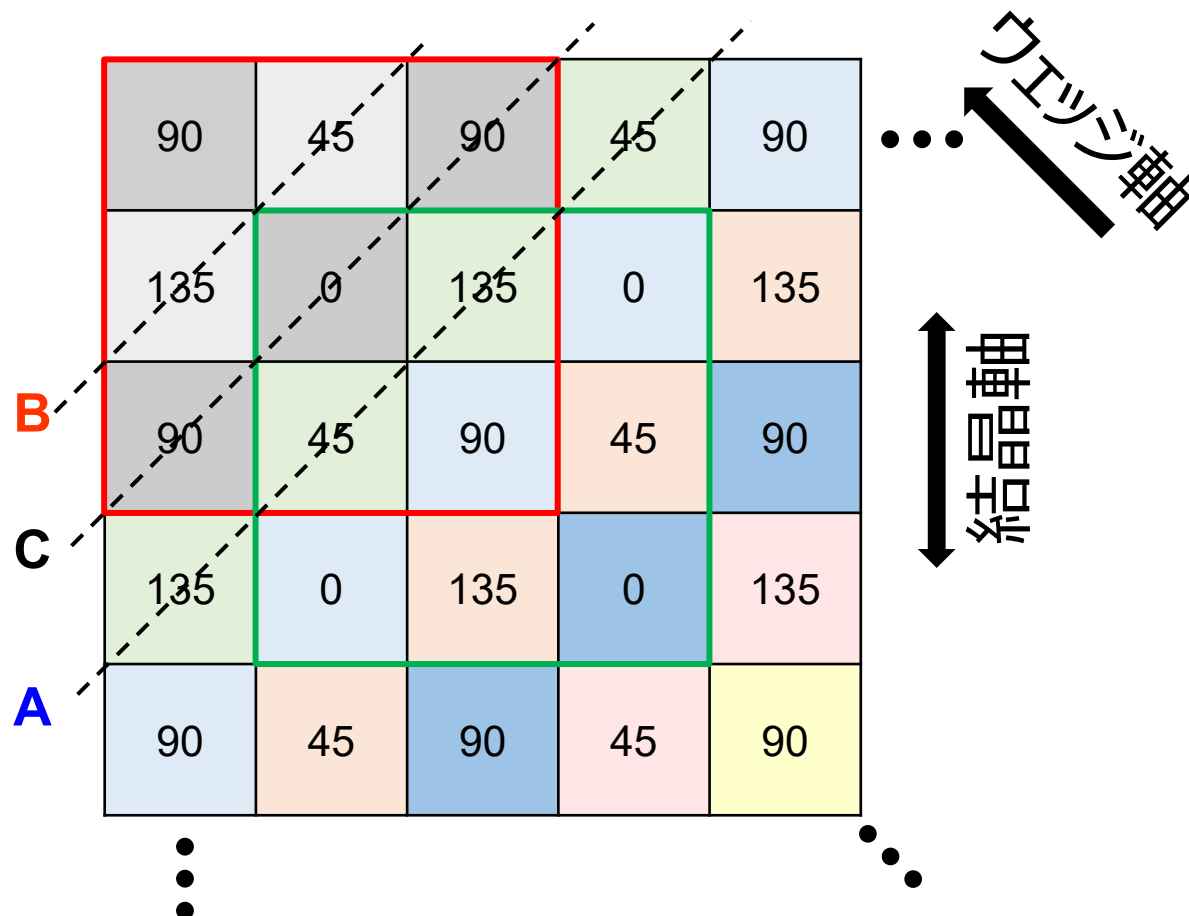
タイプ1 中心が0°

90	45	90	45	90
135	0	135	0	135
90	45	90	45	90
135	0	135	0	135
90	45	90	45	90

タイプ2 中心が90°

90	45	90	45	90
135	0	135	0	135
90	45	90	45	90
135	0	135	0	135
90	45	90	45	90

複屈折ウェッジで冗長性の解消

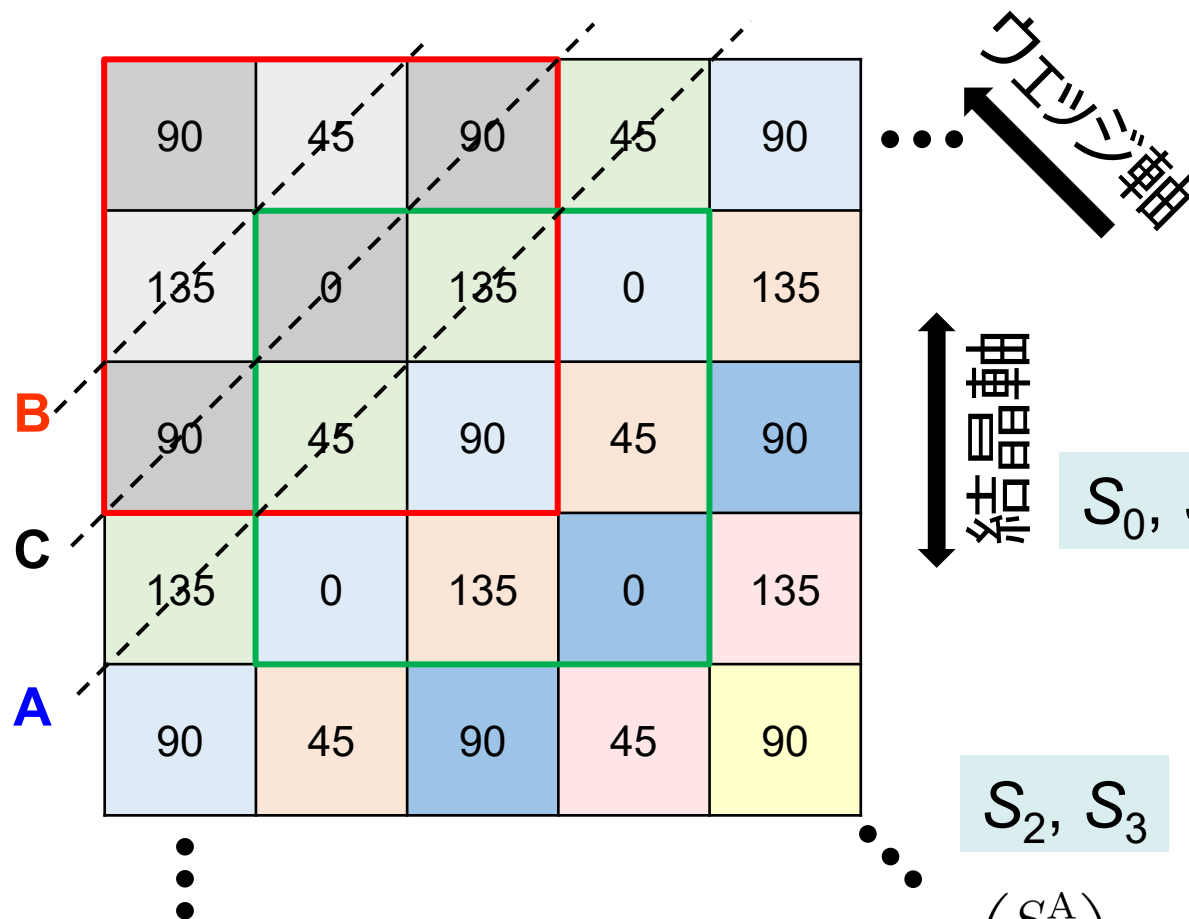


A上の 45° , 135° とB上の 45° , 135° ではウェッジ厚みの違いにより異なる位相差 δ_A , δ_B が生じる



複屈折結晶（水晶等）ウェッジの厚み：厚（濃）、薄（淡）

S_0, S_1, S_2, S_3 の算出



赤枠もしくは緑枠で囲んだ
3x3画素が単位偏光解析画素

S_0, S_1

$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0^C + I_{90}^C \\ I_0^C - I_{90}^C \end{pmatrix}$$

S_2, S_3

$$\begin{pmatrix} S_2^A \\ S_2^B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_2 \cos \delta_A - S_3 \sin \delta_A \\ S_2 \cos \delta_B - S_3 \sin \delta_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{45}^A - I_{135}^A \\ I_{45}^B - I_{135}^B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin(\delta_B - \delta_A)} \begin{pmatrix} S_2^A \sin \delta_B - S_2^B \sin \delta_A \\ S_2^A \cos \delta_B - S_2^B \cos \delta_A \end{pmatrix}$$

位相差の設計

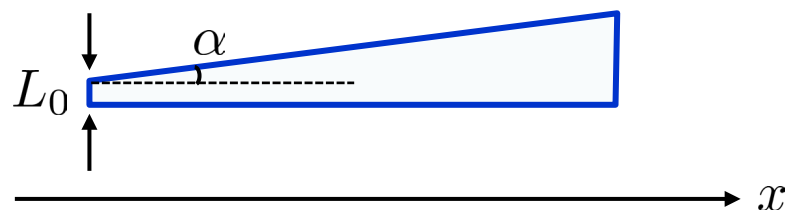
$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0^C + I_{90}^C \\ I_0^C - I_{90}^C \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin(\delta_B - \delta_A)} \begin{pmatrix} (I_{45}^A - I_{135}^A) \sin \delta_B - (I_{45}^B - I_{135}^B) \sin \delta_A \\ (I_{45}^A - I_{135}^A) \cos \delta_B - (I_{45}^B - I_{135}^B) \cos \delta_A \end{pmatrix}$$

① 位相差 $\delta_B - \delta_A$ は装置関数： 複屈折ウェッジの仕様で決まる

ウェッジの3要素

- 複屈折量（ガラス材料依存）： Δn
- 最小厚み： L_0
- ウェッジ角： α



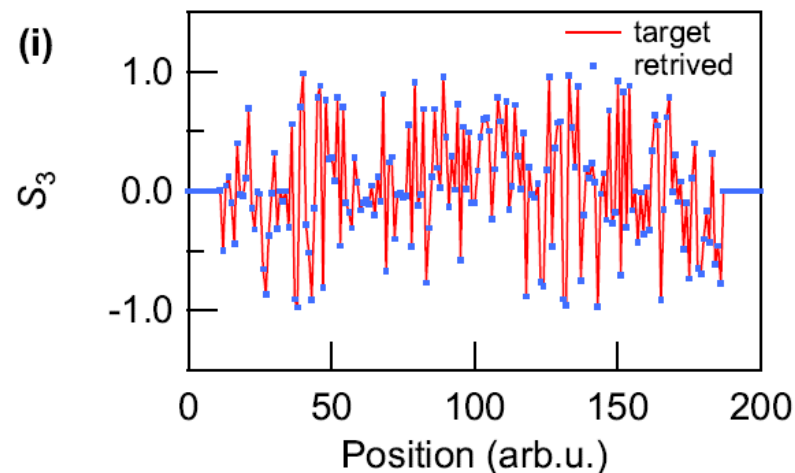
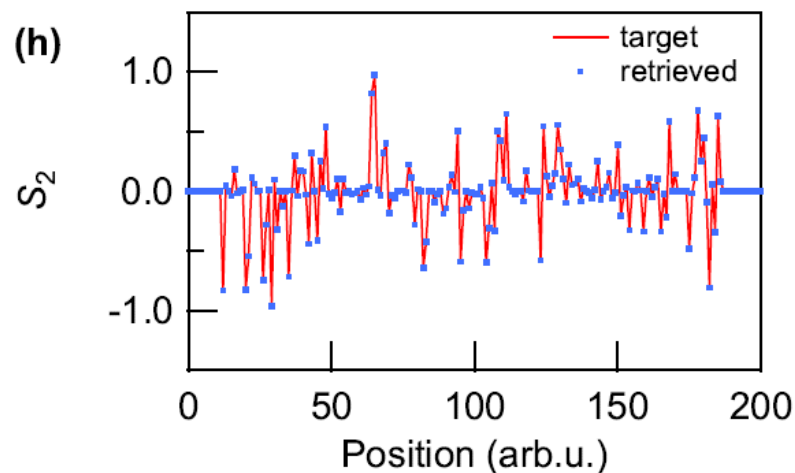
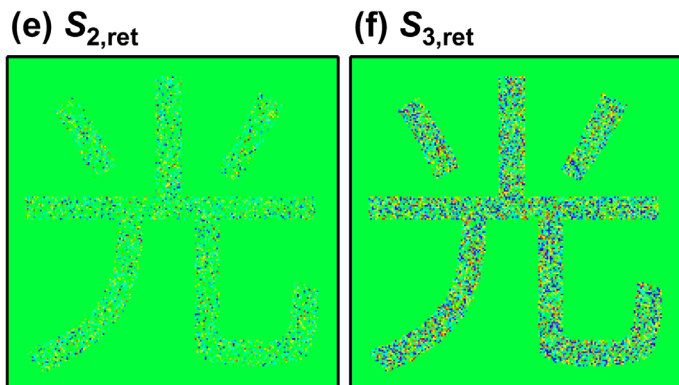
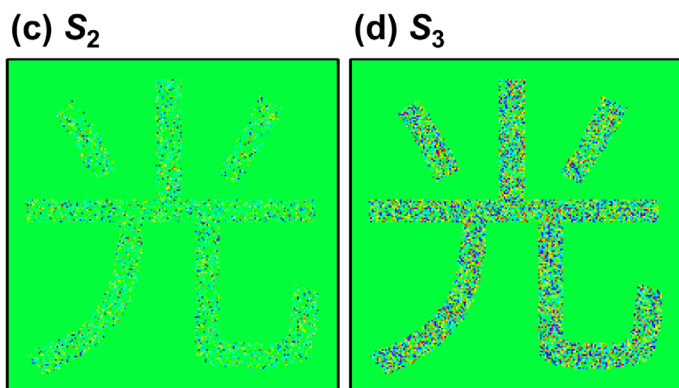
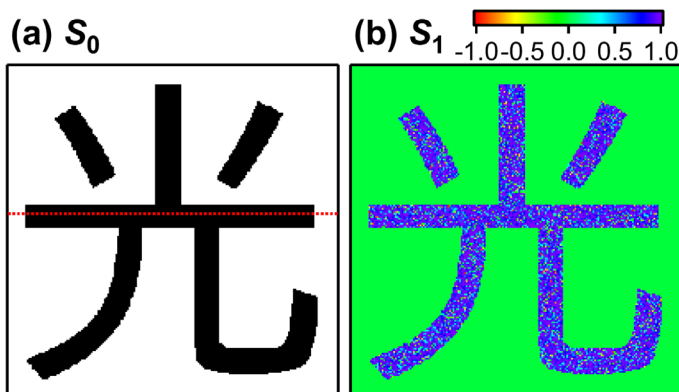
水晶, $\Delta n = 0.0092$ @ 532 nm

(注) 最小厚み L_0 は位相のオフセットに対応し機械的強さが担保できるように設計する

② $\sin(\delta_B - \delta_A) \neq 0$ が満たされる必要がある (逆行列を有する条件)

③ 単色光の入力が必須： $\delta(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L(x)$

数値シミュレーション



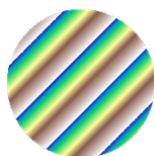
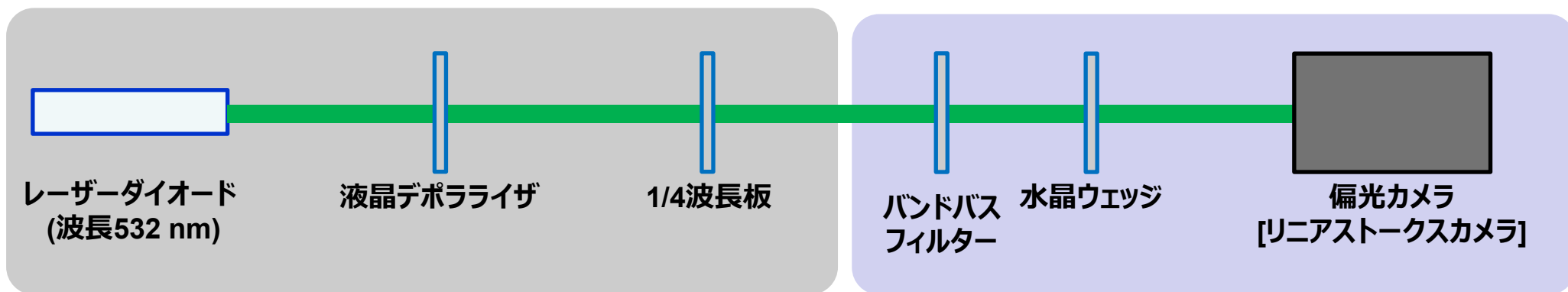
- センサーノイズ (Fixed pattern noise) を考慮して数値シミュレーションを実施。
- センサーには、最大信号量の入射を仮定

装置の性能評価

ストークスパラメーターの空間分布の作成

計測対象のフルストークスパラメーター
の空間分布の生成

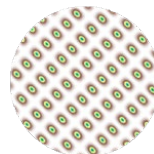
開発装置
スナップショット型フルストークス偏光カメラ



AoLP



DoLP



DoLP

複屈折ウェッジの詳細

材料：水晶

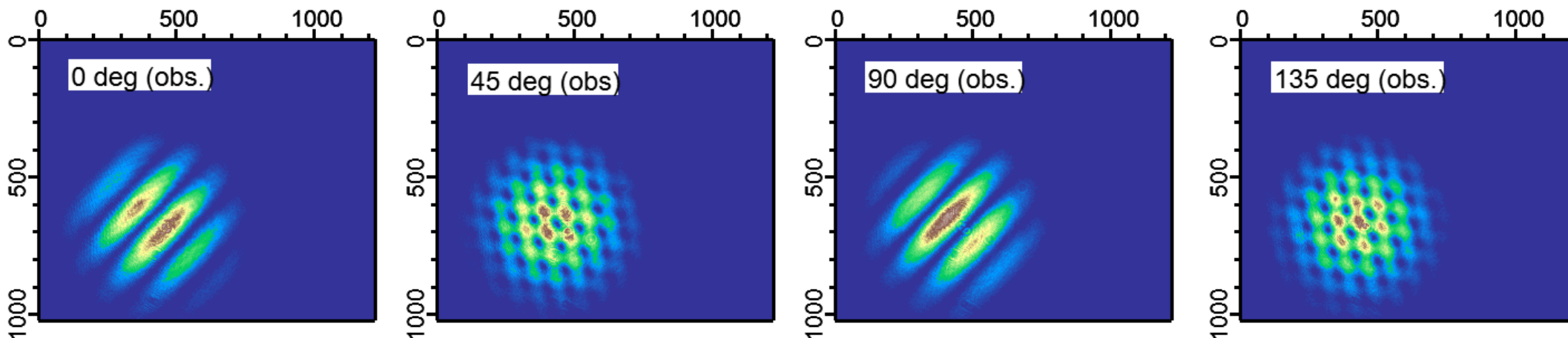
サイズ：10 mm x 10 mm

最小厚み：0.2 mm

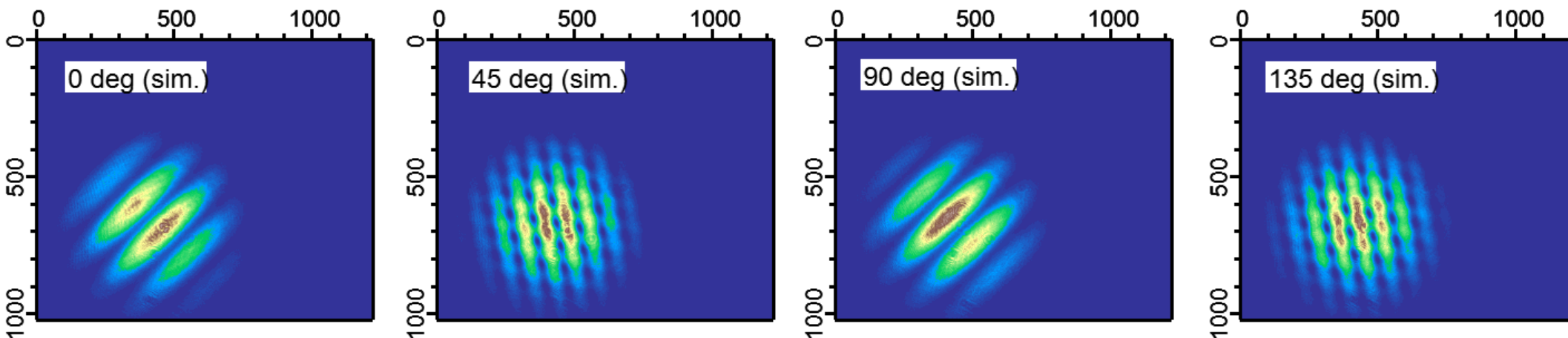
ウェッジ角：5°

実測と数値計算結果の比較

実測（偏光カメラで実際に観測された画像）

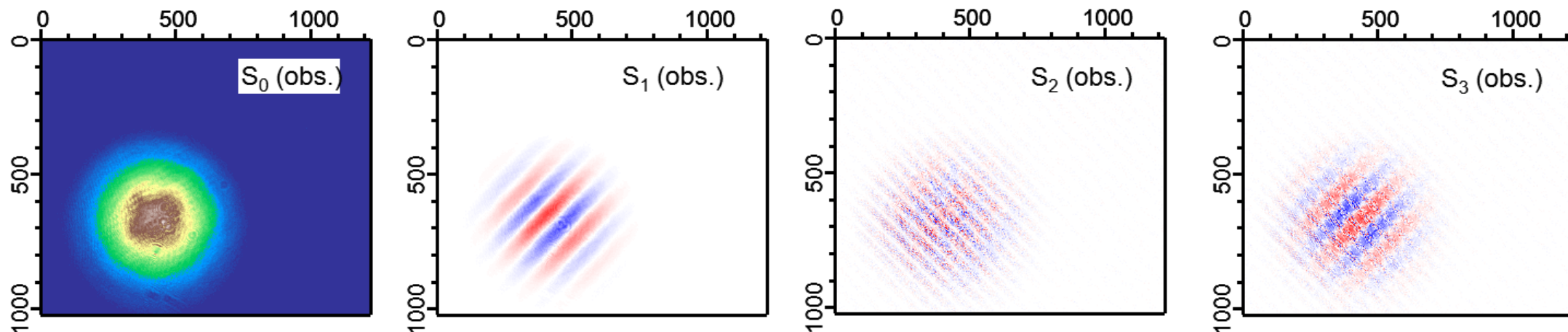


数値シミュレーション

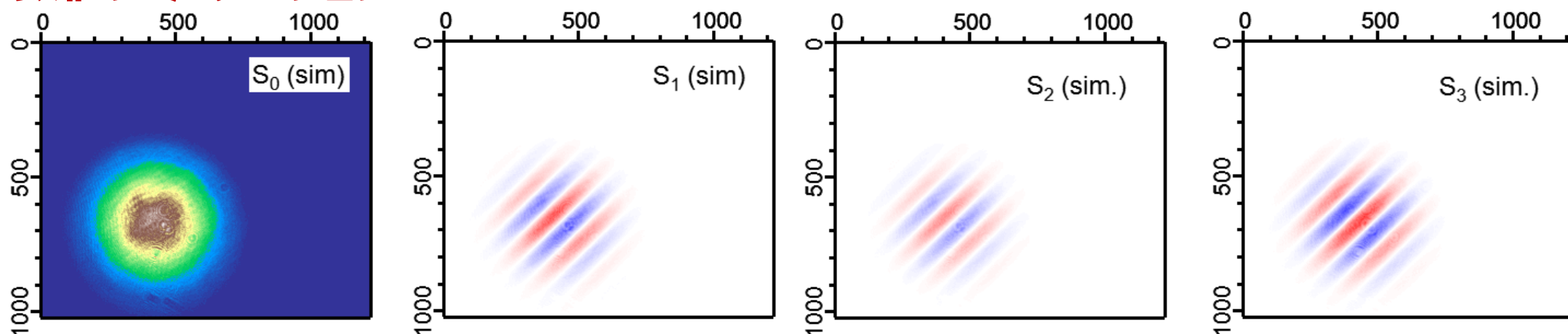


フルストークスパラメーターの再構築

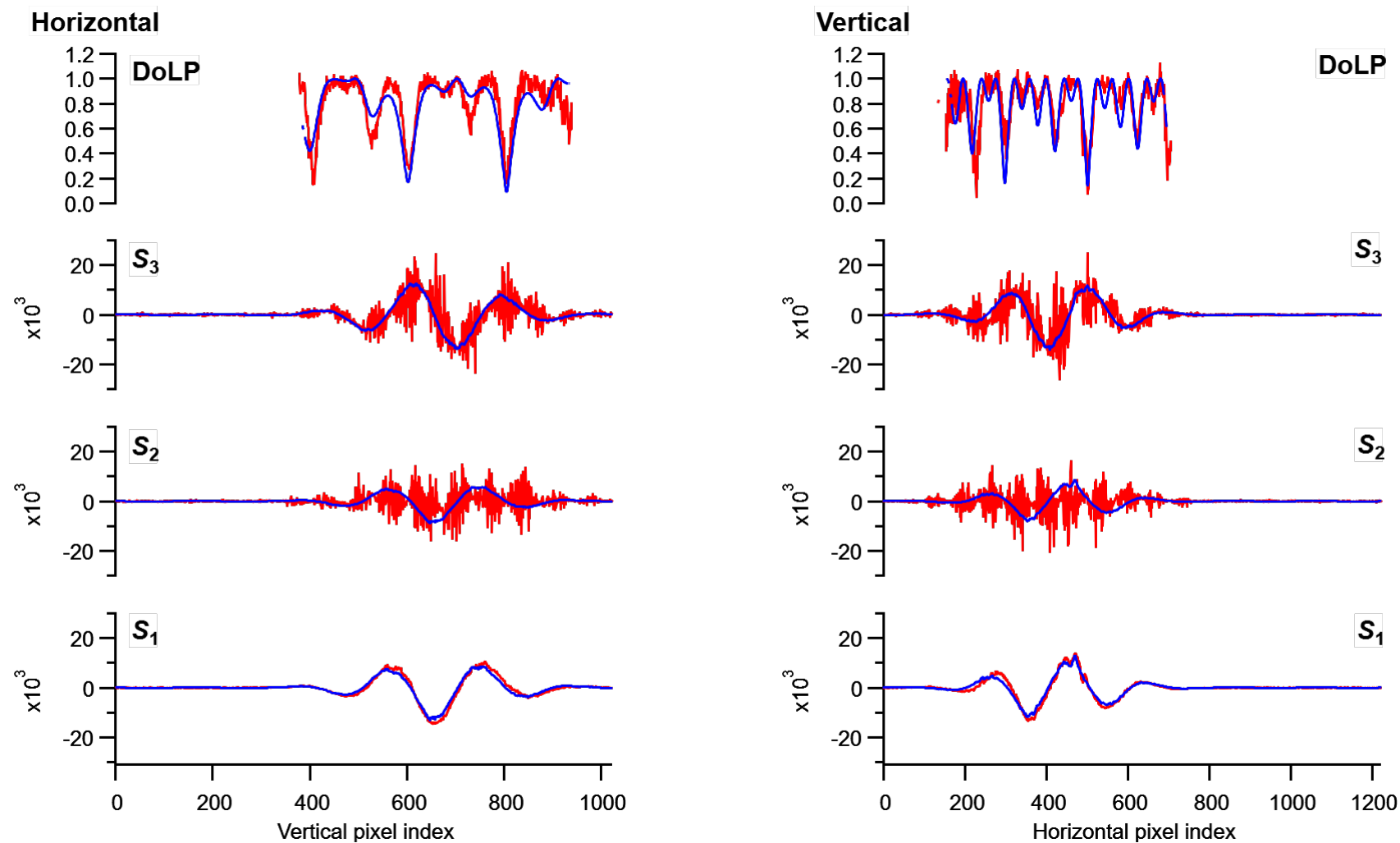
開発装置から得られたフルストークスパラメーター



数値シミュレーション



フルストークスパラメーターの再構築



偏光イメージセンサーのキャラクタリゼーション
を行うことで更に計測精度は高められる

新技術と従来技術の比較

	時分割	振幅分割	新技術
スナップショット計測	×	○	○
結像光学系	単純	複雑	単純
偏光子/リターダー	単純	単純	単純
空間分解能	高い	高い	高い
多波長対応	○	○	×
システムコスト	高い	中程度	低い
サイズ	大きい	大きい	小さい

新技術に関する特徴

- 手のひらサイズ**：28 mm x 28 mm x 50 mm程度
- 原理的には複数の複屈折材料を組み合わせることで多波長対応可能。

想定される用途

① 短時間で偏光情報が変化するシーンを撮像する場合
(円偏光度の動的変化の観測)

② 原理的には、**近赤外波長領域**における、スナップショット型フルストークスカメラも製作可能

➡ 近赤外光では、可視光よりもレイリー散乱やミー散乱が少ないため、生体組織における長い侵入長を確保できる。

③ **円偏光レーザーパルスのキャラクタリゼーション**

レーザーパルス + プリズム + フルストークスカメラ (本開発)

→ $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$, $S_3(\lambda)$ のシングルショット計測

実用化に向けた課題

- ① 現在、フルストークスイメージが撮像可能なところまで開発済み。しかし、装置関数を計測および偏光イメージセンサーのキャリブレーションに時間を要する。
- ② 高消光比と高解像度を両立する偏光イメージセンサーは可視域（400-700 nm）に限られる。
- ③ 実用化（量産化）には、自動キャリブレーションが可能な装置の開発が必要。

今後の展開

- スナップショット型偏光カメラ -

① リニアストークスカメラ

$$S_0(x, y), S_1(x, y), S_2(x, y)$$

高性能なものが既に市販化
例) IMX250MZR (Sony)

② フルストークスカメラ

$$S_0(x, y), S_1(x, y), S_2(x, y), S_3(x, y)$$

今回の開発事項

③ フルストークス分光カメラ

$$S_0(x, y, \lambda), S_1(x, y, \lambda), S_2(x, y, \lambda), S_3(x, y, \lambda)$$

今後の開発事項

④ 時間分解フルストークス分光カメラ

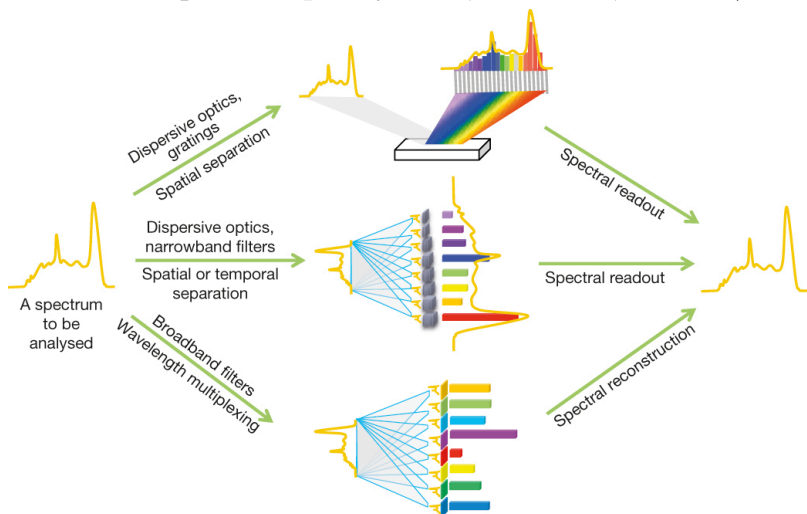
$$S_0(x, y, \lambda, t), S_1(x, y, \lambda, t), S_2(x, y, \lambda, t), S_3(x, y, \lambda, t)$$

今後の開発事項
(究極システム)

今後の展開

- マルチプレックス分光器 -

複屈折ウェッジを用いた画素毎に異なるスペクトルフィルターの作成

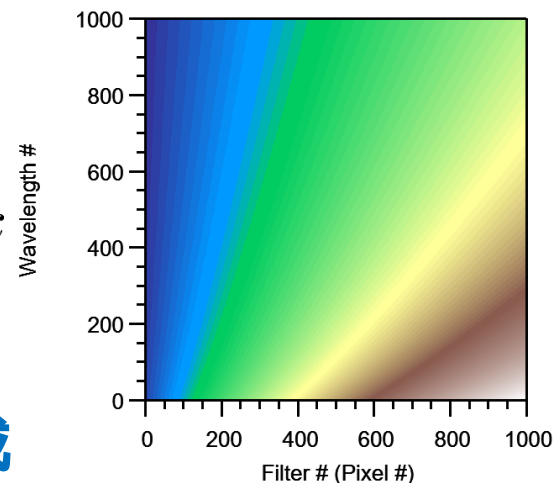


① 複屈折ウェッジ

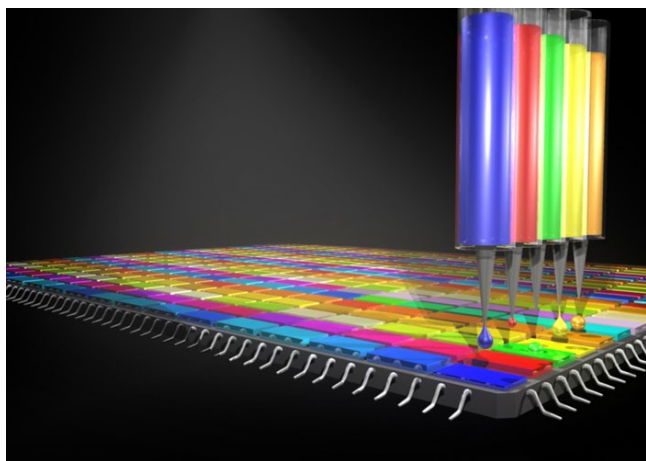
$$L(x)$$

$$\Gamma = \frac{\pi \Delta n L(x)}{\lambda}$$

画素毎のフィルターの作成

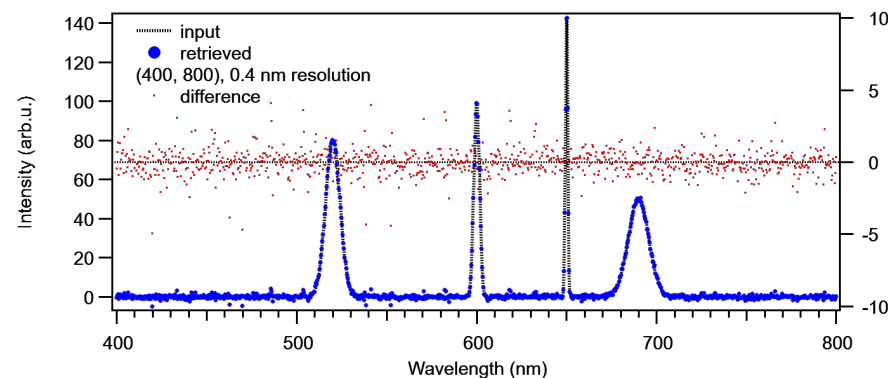
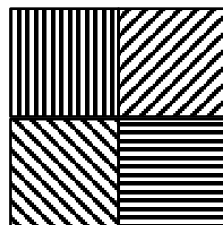


画素毎に異なるフィルター



J. Bao et al., Nature 523, 67 (2015).

② 偏光カメラ



$$I_x = \sum_{\lambda} \Psi(\lambda) M_x(\lambda)$$

再構築を行う入射スペクトル

企業への期待

光のパラメーターの一つである「偏光」は、十分に活用できているとは言い難い。

① 円偏光は散乱が強く生じる環境下において、直線偏光よりも偏光度を保ったまま伝播可能。

➡ 円偏光照射により直線偏光よりも高コントラストで被写体を撮像することが可能。

※本技術では、特に**高速に円偏光度が変化**するような被写体の撮像に威力を発揮する。

➡ **光の偏光情報を利用した顕微鏡等の開発**中の企業には、本技術の導入が有効と思われる。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：撮像素子、撮像装置、および、撮像システム
- 公開番号：特開2023-7699
- 出願人：理化学研究所
- 発明者：沖野友哉、緑川克美

お問い合わせ先



株式会社理研鼎業（りけんていぎょう）

新技術説明会事務局

E-mail: senryaku@innovation-riken.jp