

# 自然な光のカラー多重 ホログラフィックイメージング法

情報通信研究機構 電磁波研究所

電磁波応用総合研究室 研究員 田原 樹

2021年2月5日

# レーザを用いず，自然な光のカラーホログラムを モノクロイメージセンサで記録し，カラー 3次元イメージングすることが可能な技術の紹介

## 目次

- デジタルホログラフィ – 3次元センシング技術 –
- 計算コヒーレント多重方式
- ハロゲンランプを用いたカラーホログラフィック3次元顕微鏡
- ホログラフィの3次元蛍光顕微鏡への応用
- 単一露光CCS
- 将来に目指すホログラフィック3次元顕微鏡の形
- 実現に向けた課題と企業への期待

# 写真技術とホログラフィ

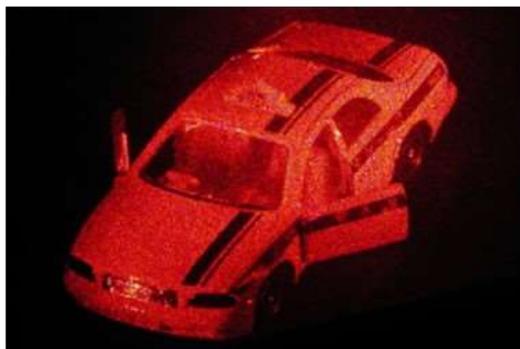
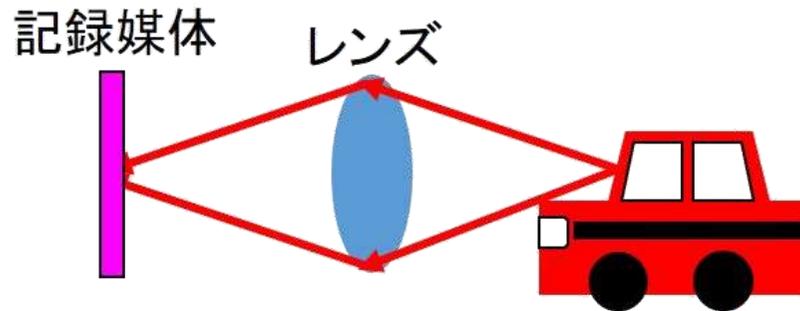
## - 写真技術:

光の明るさ(強度)を記録, 2次元情報を2次元媒体に記録

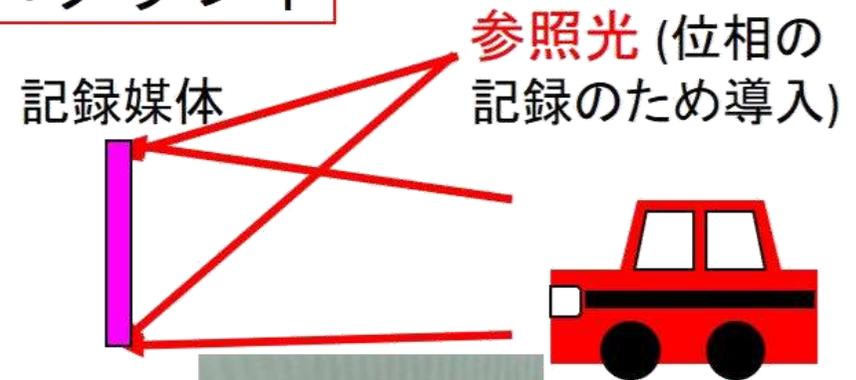
## - ホログラフィ:

光の強度に加え位相(光波の伝播方向)を記録, 3次元情報を2次元媒体に記録

### 写真技術



### ホログラフィ



ホログラム



# デジタルホログラフィ

J. Goodman, *Appl. Phys. Lett.* 11 (1967) 77.

- 記録:  
光の干渉を利用し, 干渉縞画像をイメージセンサでデジタル記録
- 再生:  
デジタル記録された画像(ホログラム)に光を計算機内で仮想的に照明し,  
光の回折を数値計算することにより3次元情報が再生

記録

再生

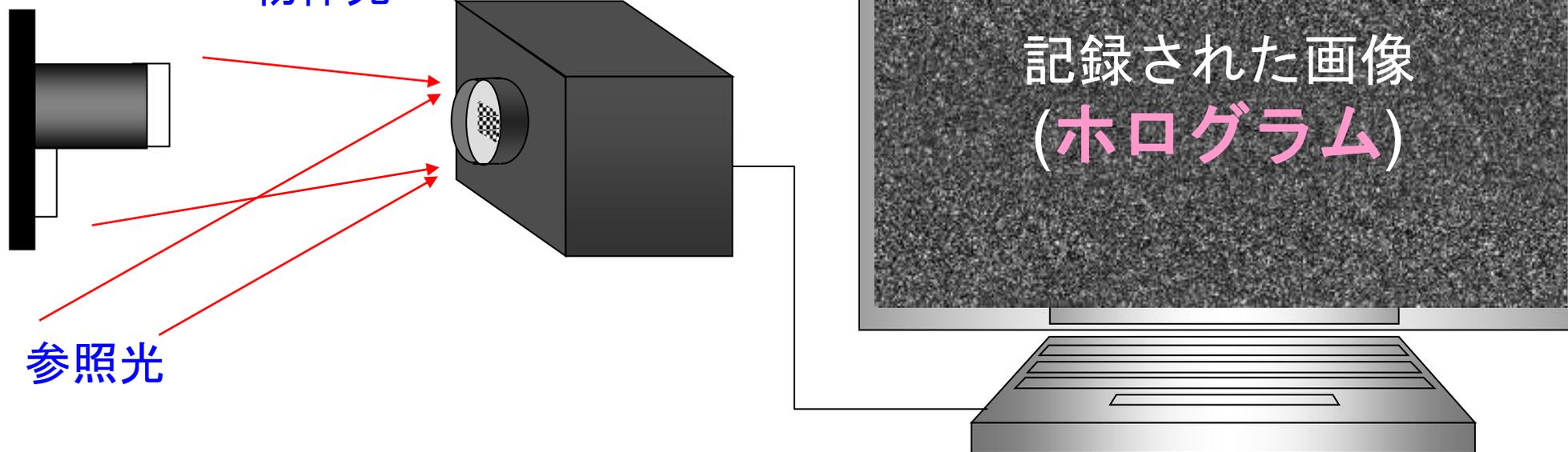
3次元物体

物体光

レンズレス  
カメラ

参照光

記録された画像  
(ホログラム)



# ホログラムを得る条件

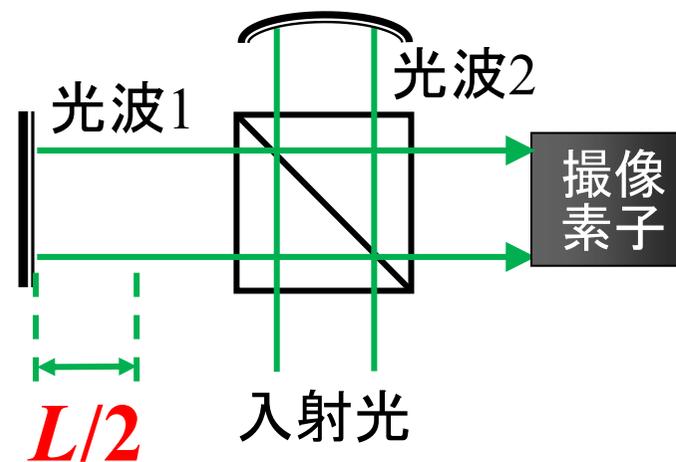
干渉縞を得るには、2光波の光路長差 $L$ が可干渉距離以内であることが一つの目安とされている

コヒーレント光

S社レーザ (100万円台):  
計算上, 100 m 以上

インコヒーレント光

ハロゲンランプ  
(波長フィルタ無し):  
おおよそ  $1 \mu\text{m}$



レーザと比べて, 1億分の1の可干渉距離

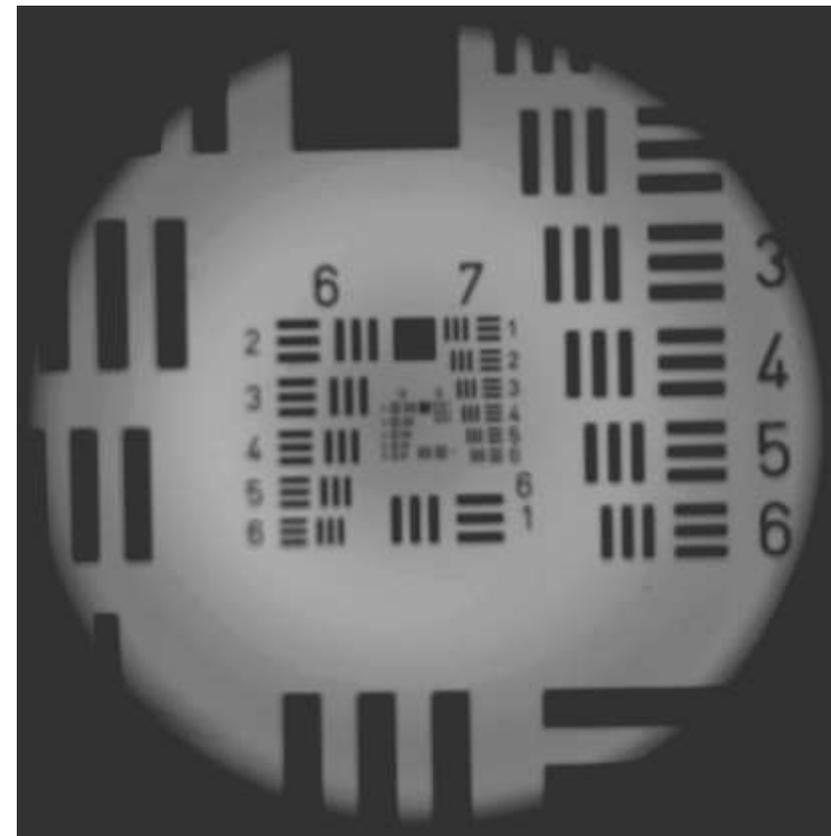
# ホログラムを得る条件

干渉縞を得るには、2光波の光路長差 $L$ が可干渉距離以内であることが一つの目安とされている

シャボン玉に見られる模様:

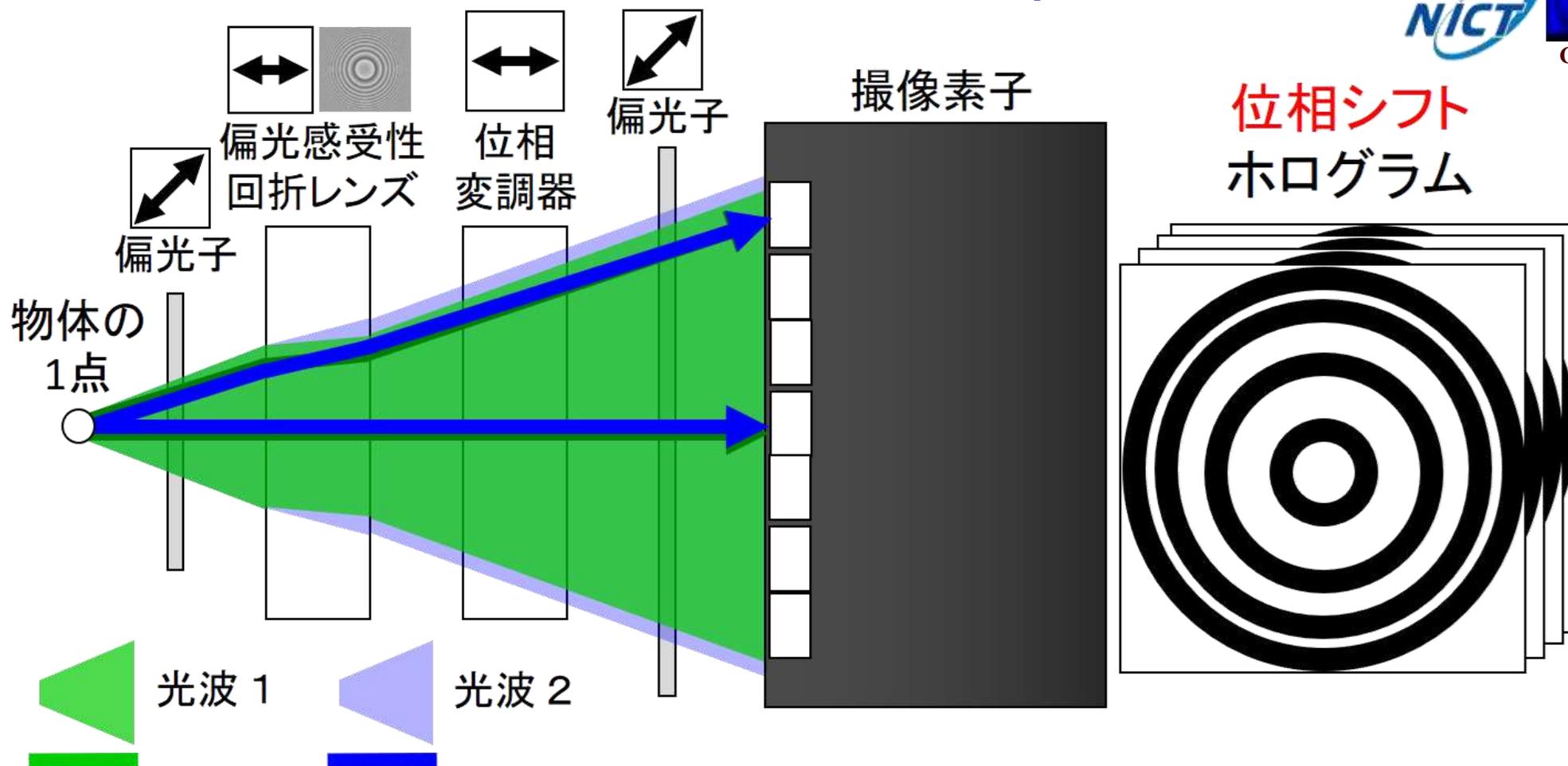
太陽光(自然な光)で得る干渉縞パターン    ハロゲンランプのホログラム

[http://www.ccs-inc.co.jp/s2\\_ps/s1/s\\_04/column/light\\_color/vol22.html](http://www.ccs-inc.co.jp/s2_ps/s1/s_04/column/light_color/vol22.html) より画像を引用



# インコヒーレントデジタルホログラフィ：FINCHシステム

J. Rosen, et al., *Adv. Opt. Photon.* **11** (2019) 1.

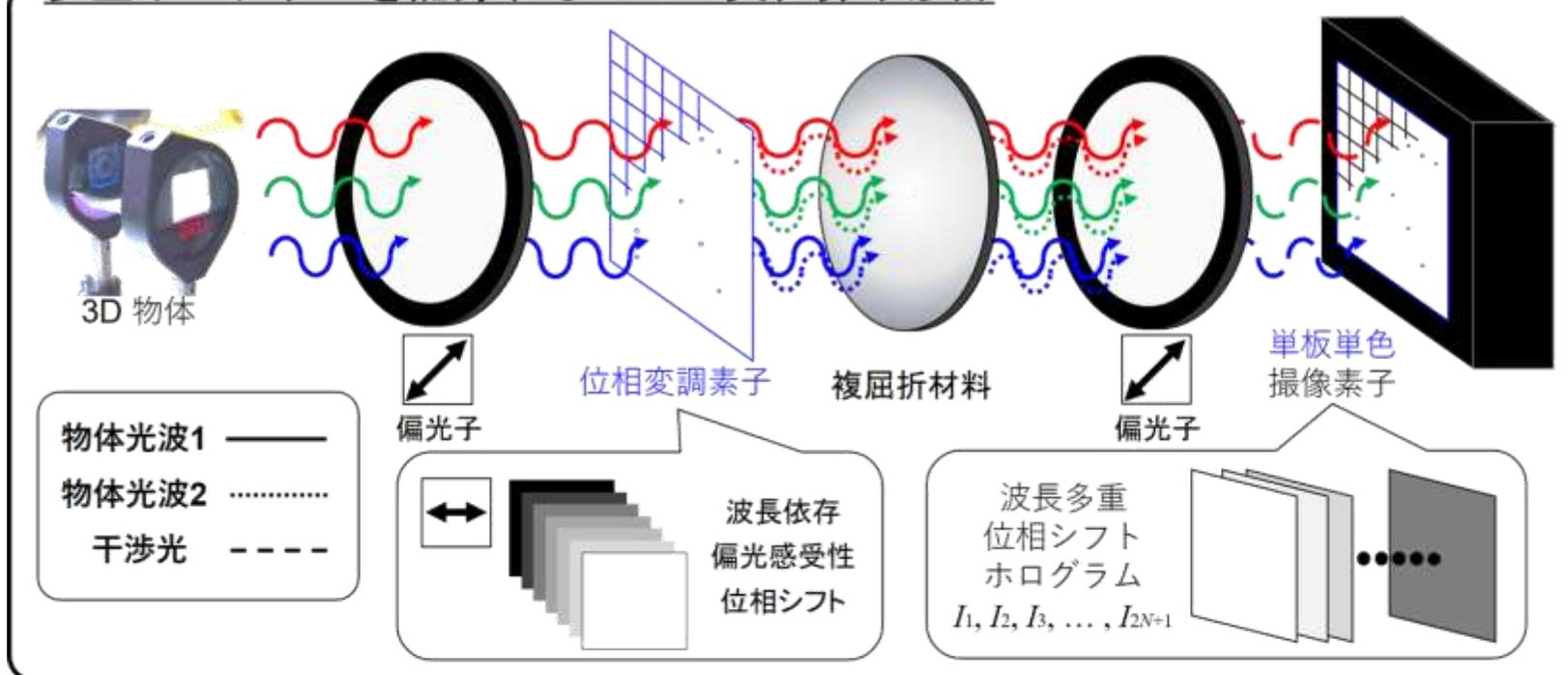


- ・耐振動性の極めて高い、**単一光路の自己干渉計**が採用
- ・偏光干渉計と**位相シフト干渉法(PSI)**の組み合わせが利用
- ・可干渉距離を考慮し、off-axis型ではなく**in-line型**が頻繁に採用
- ・高空間周波数におけるPSFの劣化を防止可能 J. Rosen, et al., *Adv. Opt. Photon.* **11** (2019) 1.
- ・波長情報の取得に波長フィルタが必要 → **計算コヒーレント多重方式**

# 計算コヒーレント多重方式(CCS)： 多次元情報を多重記録する位相シフト干渉法

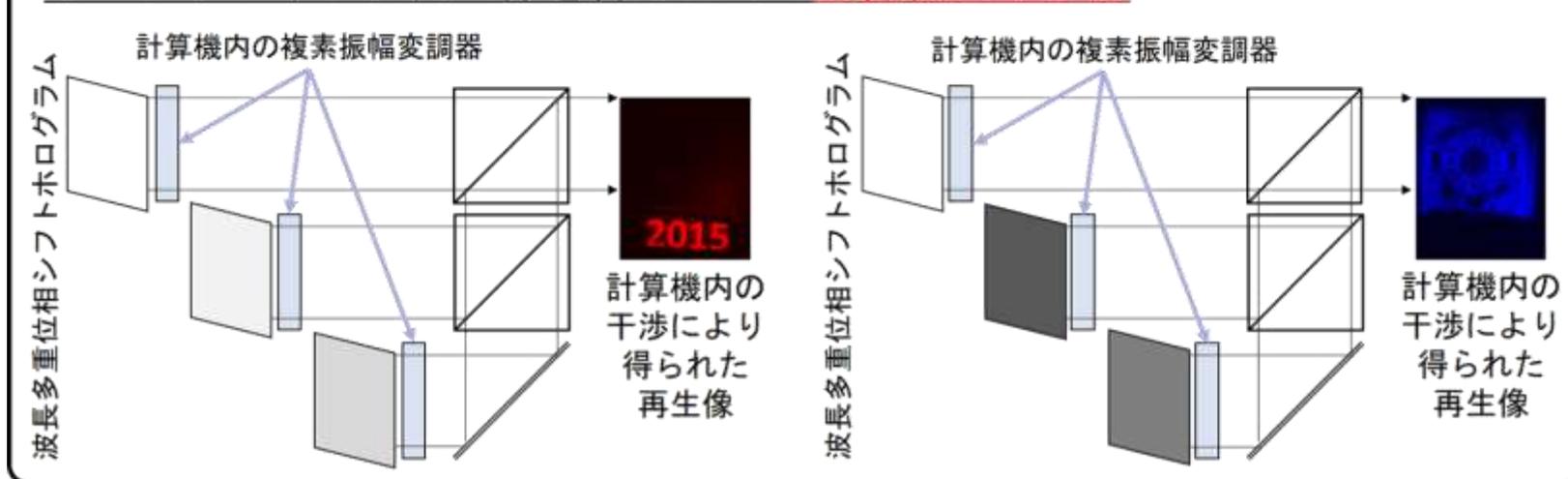
OPJ2013, 2013年11月13日.  
Opt. Lett. **40** (2015) 2810.  
Opt. Express **25** (2017) 11157.

## 多重ホログラムを記録するための実世界干渉計



*J. Opt. (IOP Publishing) 17 (2015) 125707.*

## ホログラフィック再生像を得るための計算機内干渉計\*



CCSの数学的解釈

Opt. Express 25 (2017) 11157.



$N = 2$  の場合

$N$ : 記録される波長帯数  
 $\alpha$ : 位相シフト量

$$I = PU \Rightarrow U = P^{-1}I$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(x, y: 0, 0) \\ I(x, y: \alpha_{11}, \alpha_{21}) \\ I(x, y: \alpha_{12}, \alpha_{22}) \\ I(x, y: \alpha_{13}, \alpha_{23}) \\ I(x, y: \alpha_{14}, \alpha_{24}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & \cos \alpha_{11} & \sin \alpha_{11} & \cos \alpha_{21} & \sin \alpha_{21} \\ 1 & \cos \alpha_{12} & \sin \alpha_{12} & \cos \alpha_{22} & \sin \alpha_{22} \\ 1 & \cos \alpha_{13} & \sin \alpha_{13} & \cos \alpha_{23} & \sin \alpha_{23} \\ 1 & \cos \alpha_{14} & \sin \alpha_{14} & \cos \alpha_{24} & \sin \alpha_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{0th}(x, y) \\ C_1 A_{o1}(x, y) A_{o1}'(x, y) \cos \phi_{b1}(x, y) \\ C_1 A_{o1}(x, y) A_{o1}'(x, y) \sin \phi_{b1}(x, y) \\ C_2 A_{o2}(x, y) A_{o2}'(x, y) \cos \phi_{b2}(x, y) \\ C_2 A_{o2}(x, y) A_{o2}'(x, y) \sin \phi_{b2}(x, y) \end{bmatrix}$$

**$I$**   
5枚の2波長多重  
位相シフト  
ホログラム

**$P$**   
2波長に対する  
位相シフト量を  
示す5×5行列

**$U$**   
0次回折光の総和と  
2波長物体光の  
実部, 虚部

$N$ 波長の場合, 0次回折光の総和と $N$ 波長物体光の実部, 虚部を,  
変数圧縮の効果から  $2N+1$  枚の $N$ 波長多重ホログラムから抽出

$I(x, y)$ : 波長多重ホログラム,  $\alpha_{ij}$ : 波長 $\lambda_i$ における $j$ 回目の位相シフト量,  $I_{0th}(x, y)$ : 0次回折光の総和,  
 $C_i$ : コヒーレンスに関する係数,  $A_{oi}(x, y)A_{oi}'(x, y)$ : 物体光強度,  $\phi_{bi}(x, y)$ : 干渉光の位相

# 計算コヒーレント多重方式 (CCS) + FINCH

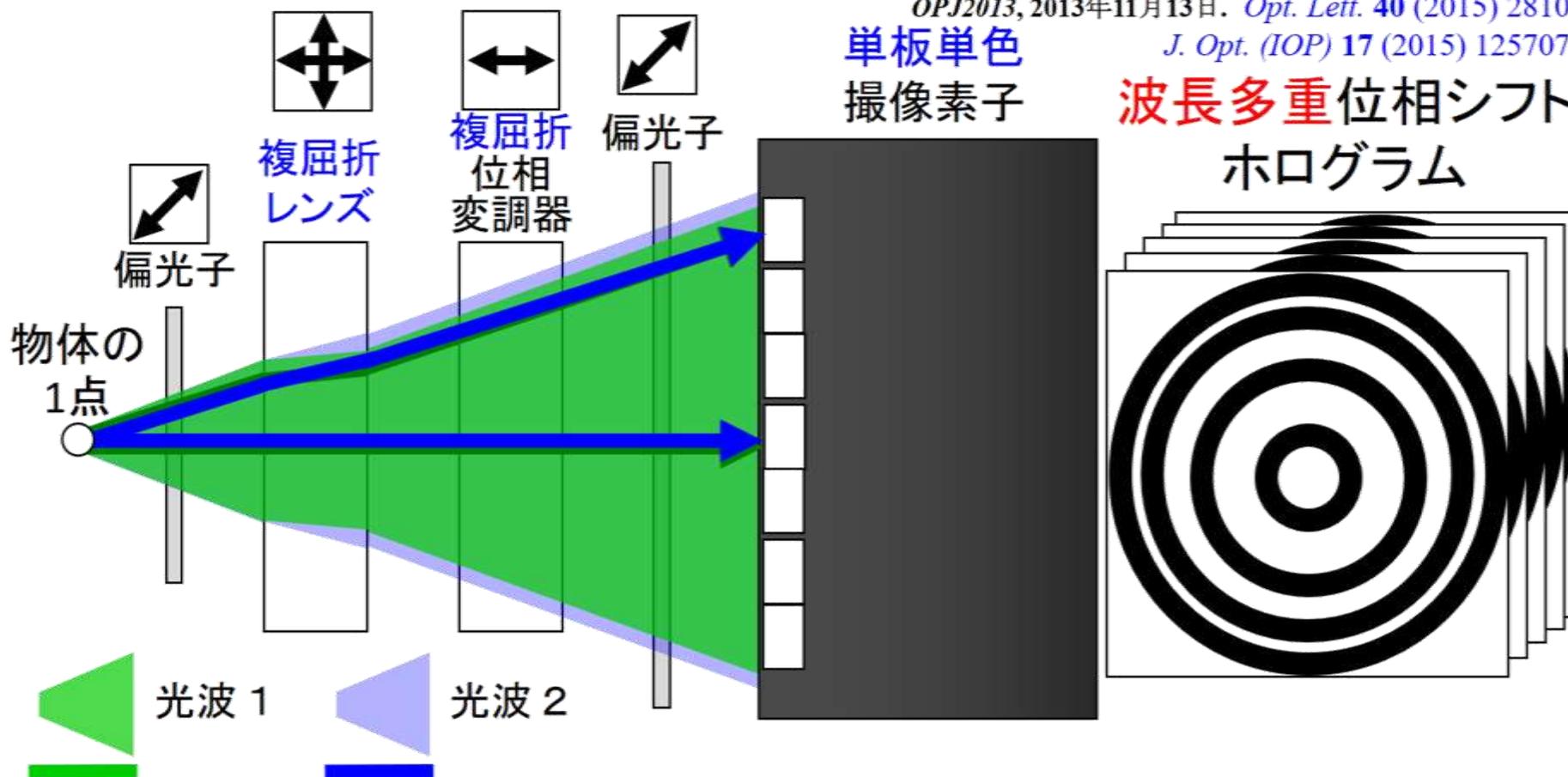
## 計算コヒーレント多重方式: 多次元情報を多重記録する位相シフト干渉法

OPJ2013, 2013年11月13日. *Opt. Lett.* **40** (2015) 2810.

単板単色  
撮像素子

*J. Opt. (IOP)* **17** (2015) 125707.

波長多重位相シフト  
ホログラム

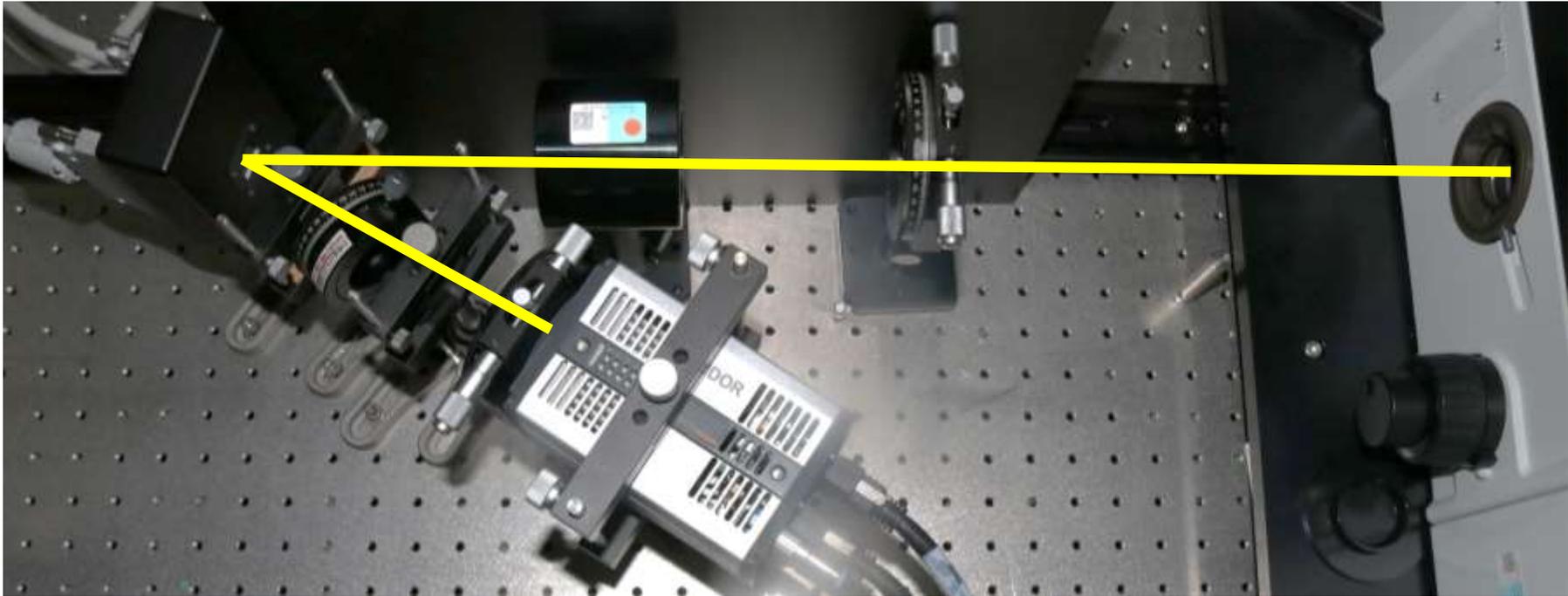


- FINCH\*や他のインコヒーレントDHシステムをそのまま採用することが可能  
\*J. Rosen, et al., *Adv. Opt. Photon.* **11** (2019) 1.
- 複数の波長情報の取得に, 波長ごとに異なる位相シフト量を付与
- 波長フィルタレスのため, 蛍光顕微鏡など, 光量の限られる条件においても, 自然な光を明るくカラーホログラフィックイメージングすることが可能と期待

# ハロゲンランプの白色照明光を用いたCCS-FINCHシステム

*Opt. Lett.* 45 (2020) 2482.

新技術説明会  
New Technology Presentation Meetings!



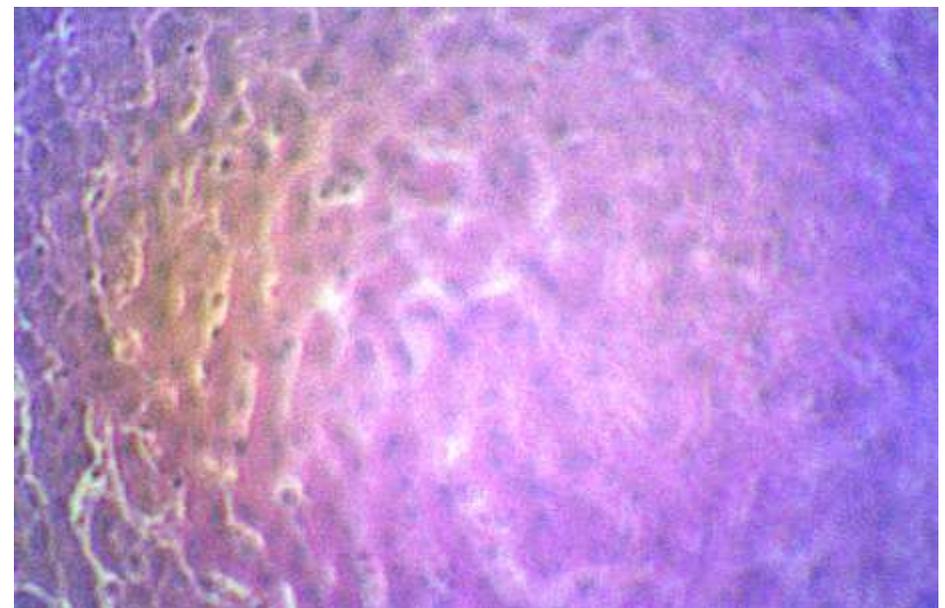
光学系の倍率: 13, 対物レンズのN.A.: 0.95  
7枚の波長多重ホログラムを記録

マルチバンドパスフィルタを使用  
(457, 530, 628 nm, FWHM: 20 nm)

複屈折レンズを使用 ( $f = 180$  mm)

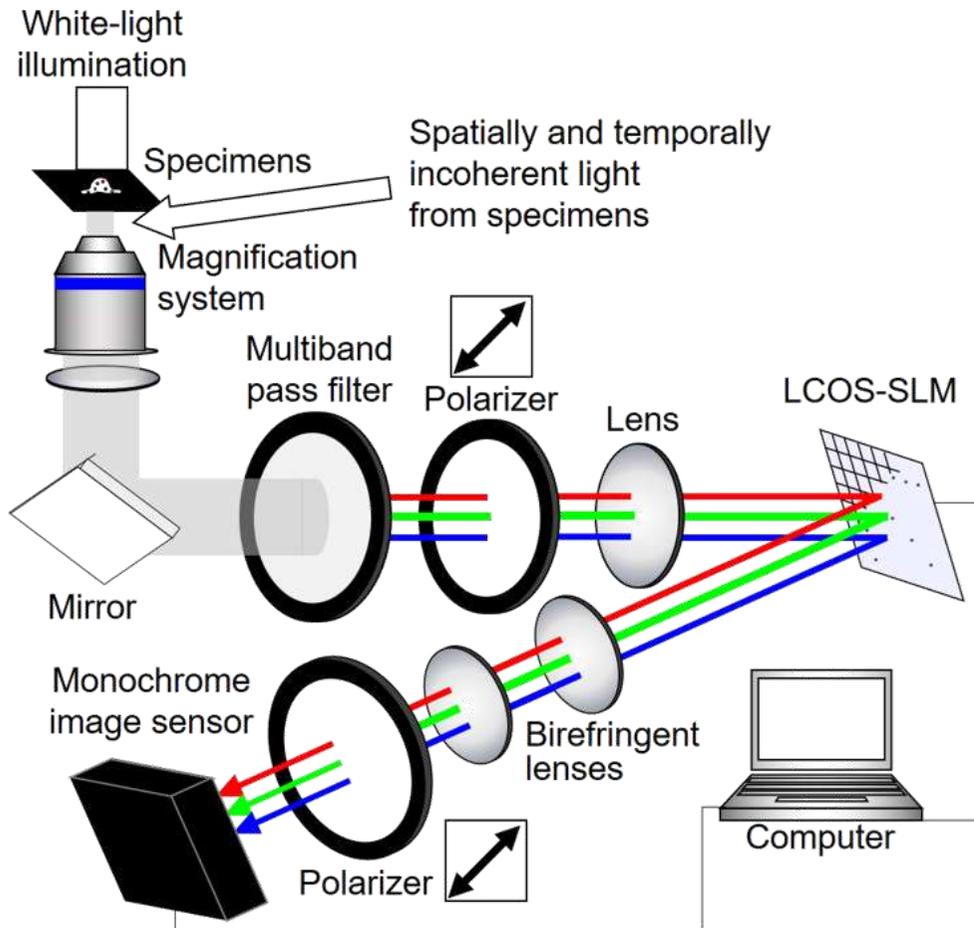
HE染色されたマウス肝臓細胞  
視野(幅): 380  $\mu$ m

- Optics Letters誌 海外研究者よりEditor's pick選出
- OSA Publishing ホームページにて  
Image of the week (2020.5.26)



# ハロゲンランプの白色照明光を用いたCCS-FINCHシステム

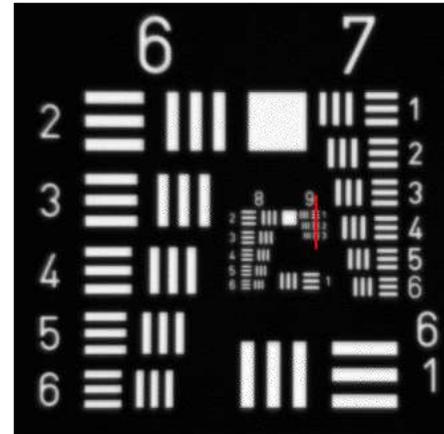
Opt. Lett. 45 (2020) 2482.



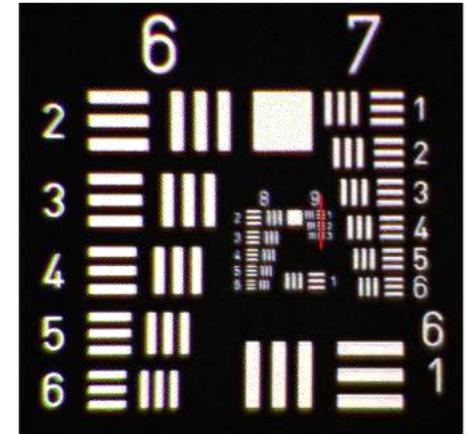
光学系の倍率: 13  
 対物レンズのN.A.: 0.95  
 7枚の波長多重ホログラムを記録  
 マルチバンドパスフィルタを使用  
 (457, 530, 628 nm, FWHM: 20 nm)

複屈折レンズを使用 ( $f = 180$  mm, Sigma KOKI co. Ltd.)

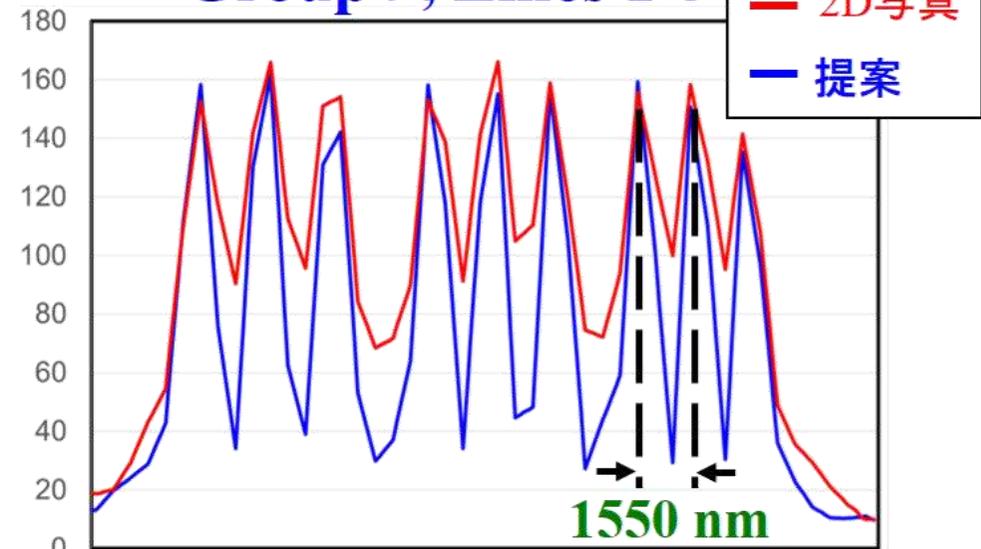
モノクロ写真



再生像(色合成後)

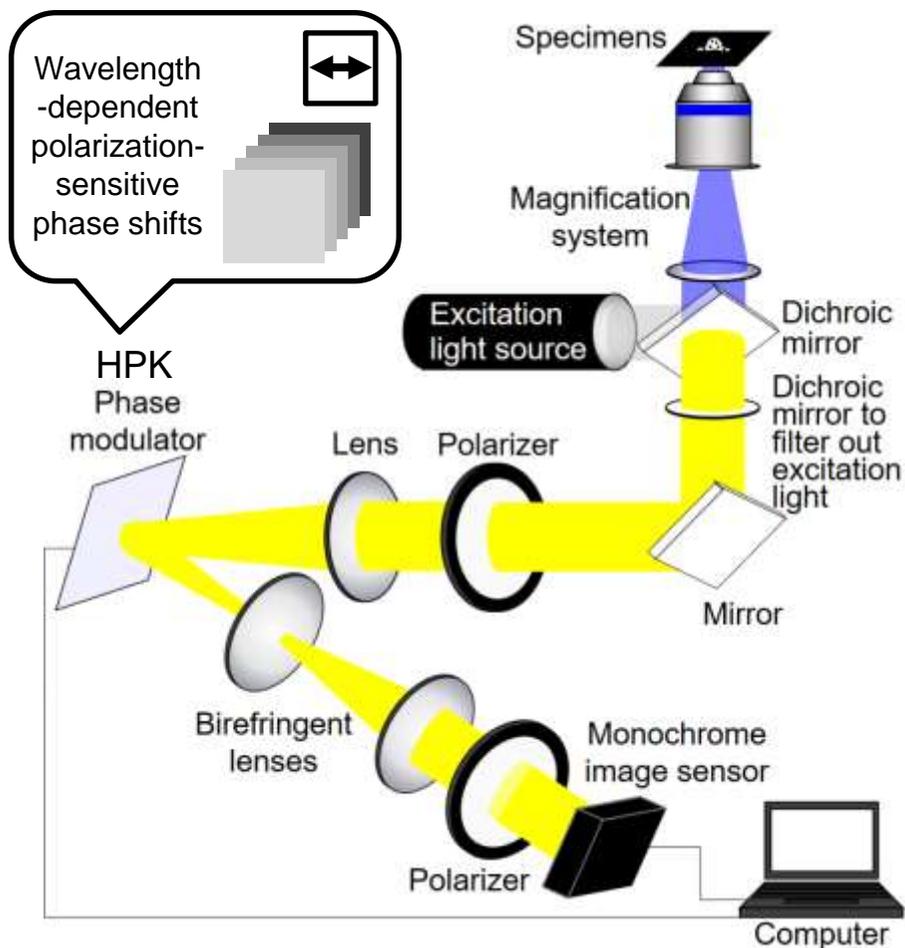


Group 9, Lines 1-3



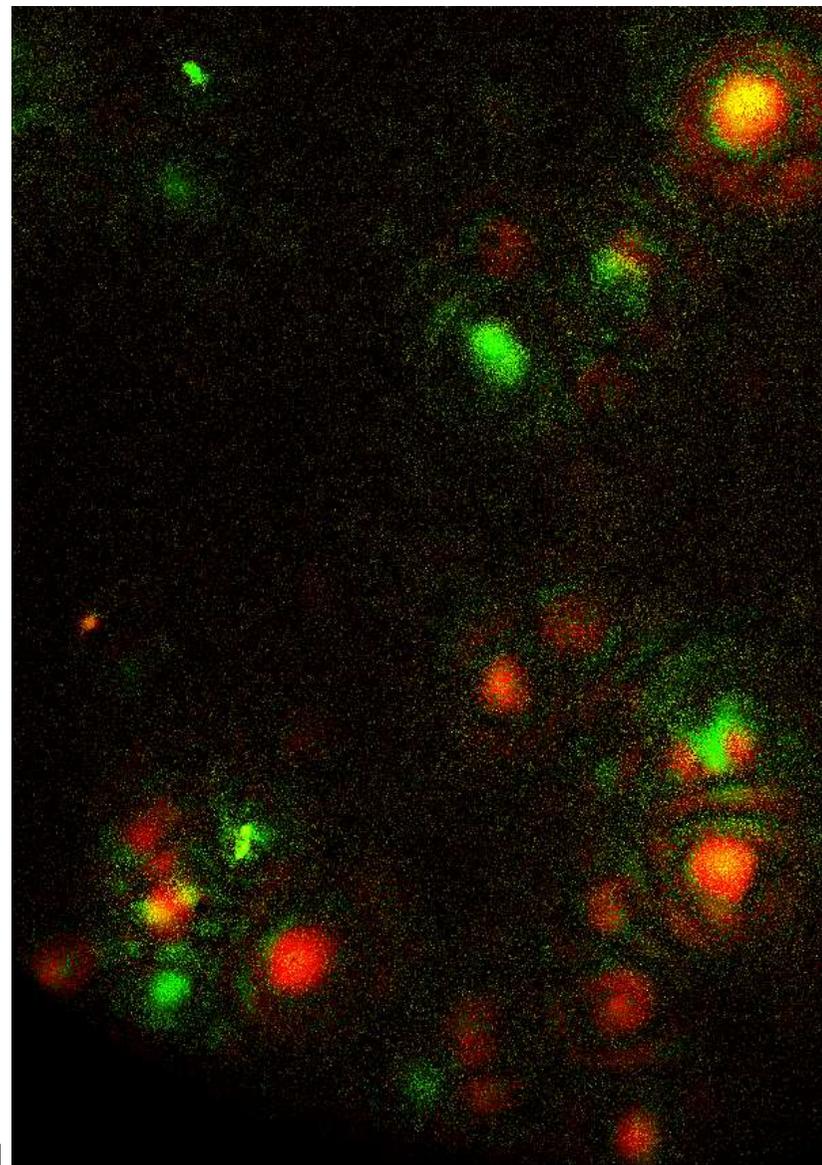
# CCS-FINCHシステムのカラー3次元蛍光顕微鏡応用

Appl. Opt. (in press, <https://doi.org/10.1364/AO.406068>)



Eu錯体: 618 nm

Tb錯体: 545 nm



光学系の倍率: 13

対物レンズのN.A.: 0.95

5枚の波長多重ホログラムを記録

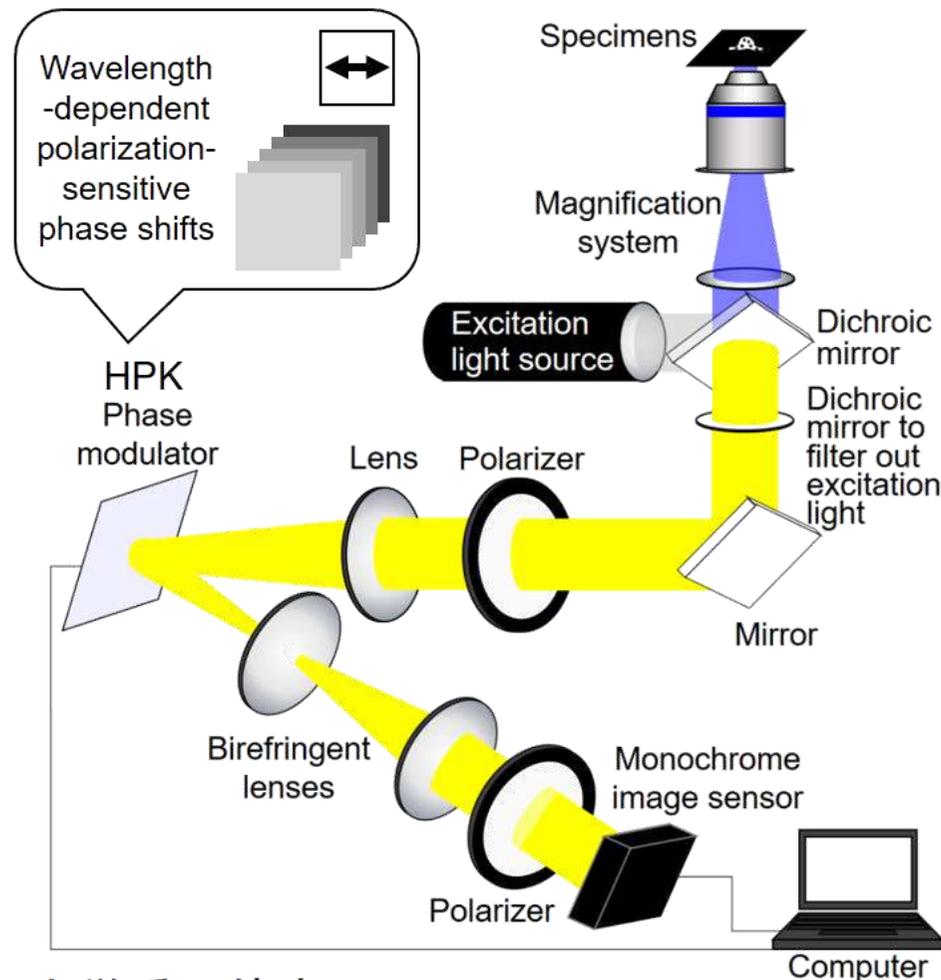
励起光をカットする波長フィルタのみを使用  
蛍光を分離する波長フィルタは不要

複屈折レンズを使用 ( $f = 180$  mm)

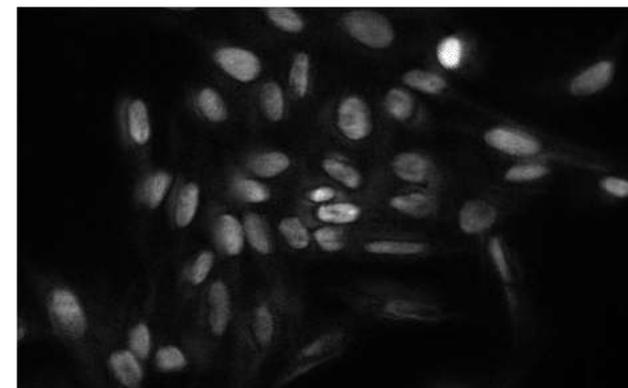
50  $\mu$ m

# CCS-FINCHシステムのカラー3次元蛍光顕微鏡応用

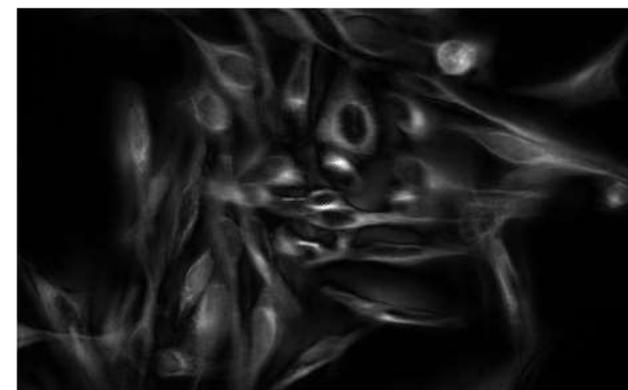
Appl. Opt. (in press, <https://doi.org/10.1364/AO.406068>)



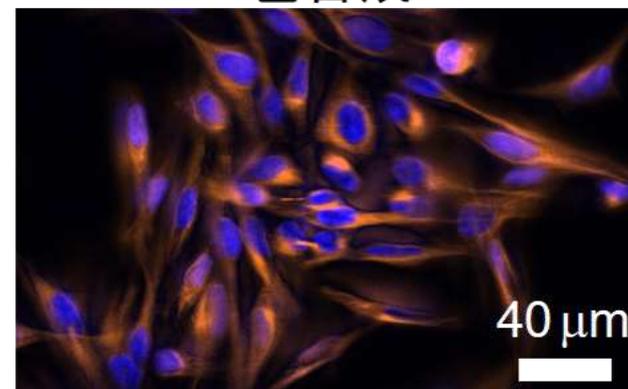
細胞核



細胞骨格



色合成



光学系の倍率: 30

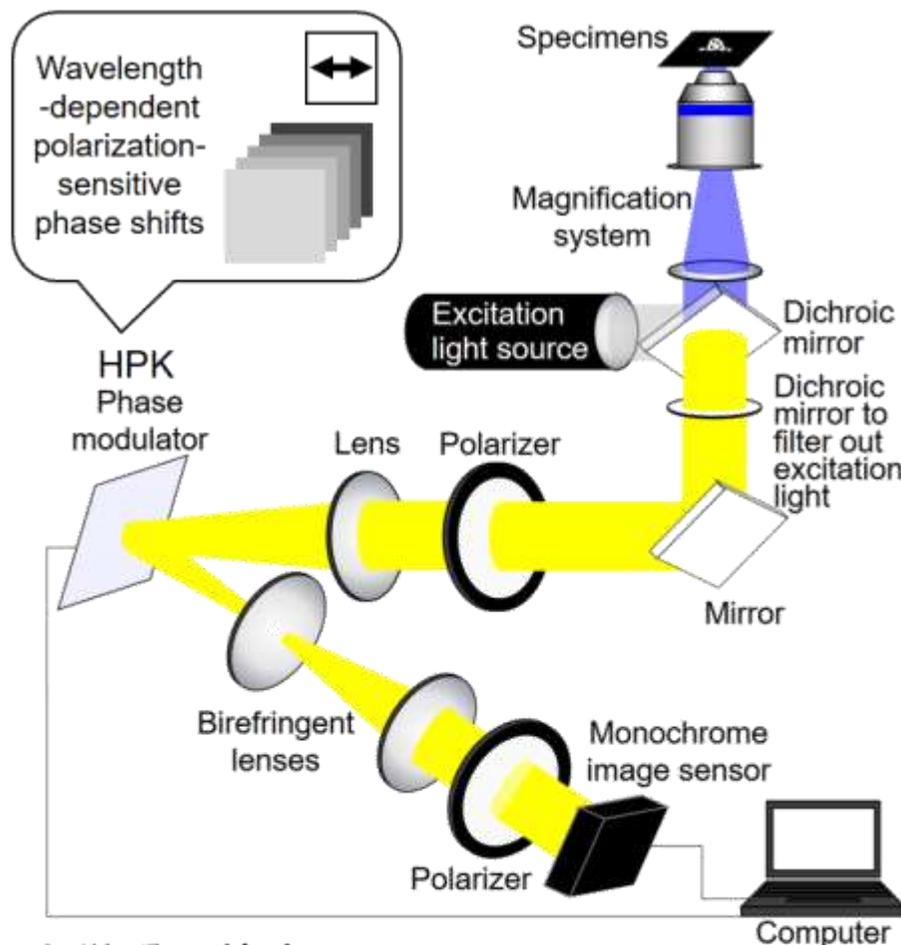
対物レンズのN.A.: 1.15

5枚の波長多重ホログラムを記録

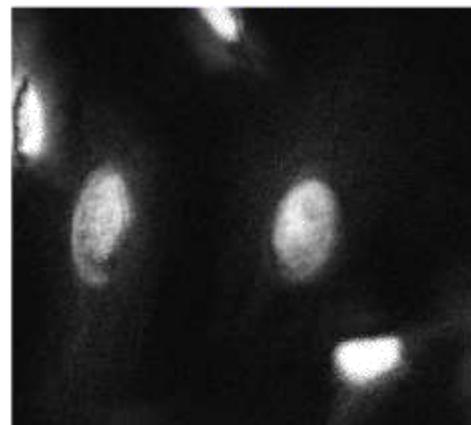
試料: 蛍光染色されたHeLa細胞

複屈折レンズを使用 ( $f = 180 \text{ mm}$ )

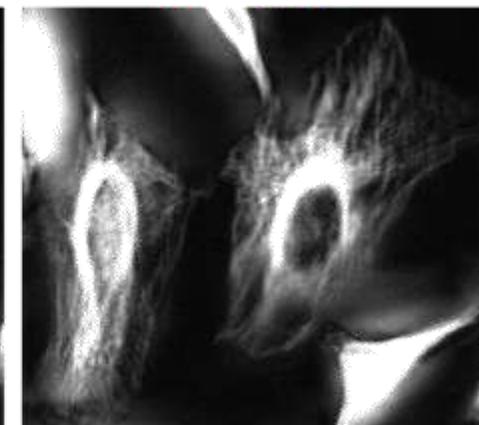
# CCS-FINCHシステムのカラー3次元蛍光顕微鏡応用



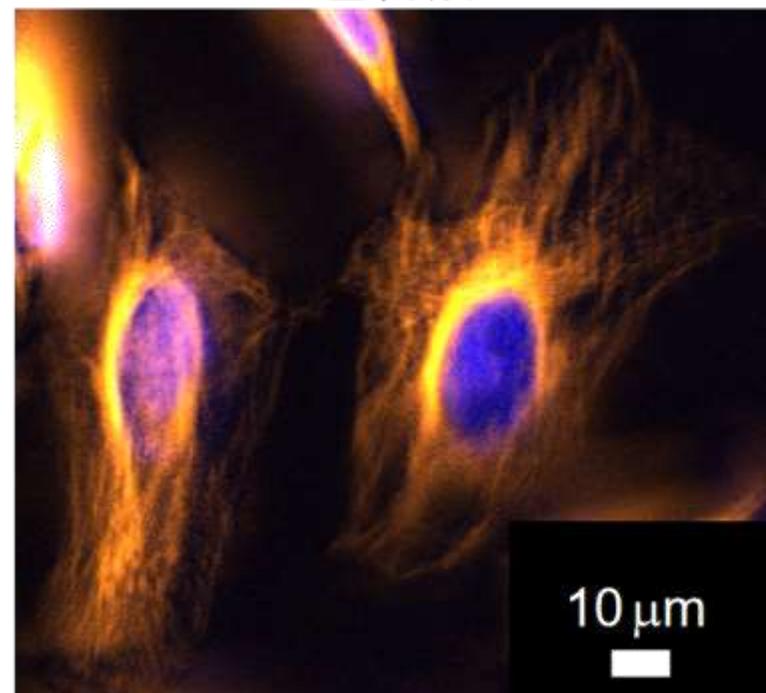
細胞核



細胞骨格



色合成



光学系の倍率: 30

対物レンズのN.A.: 1.15

5枚の波長多重ホログラムを記録

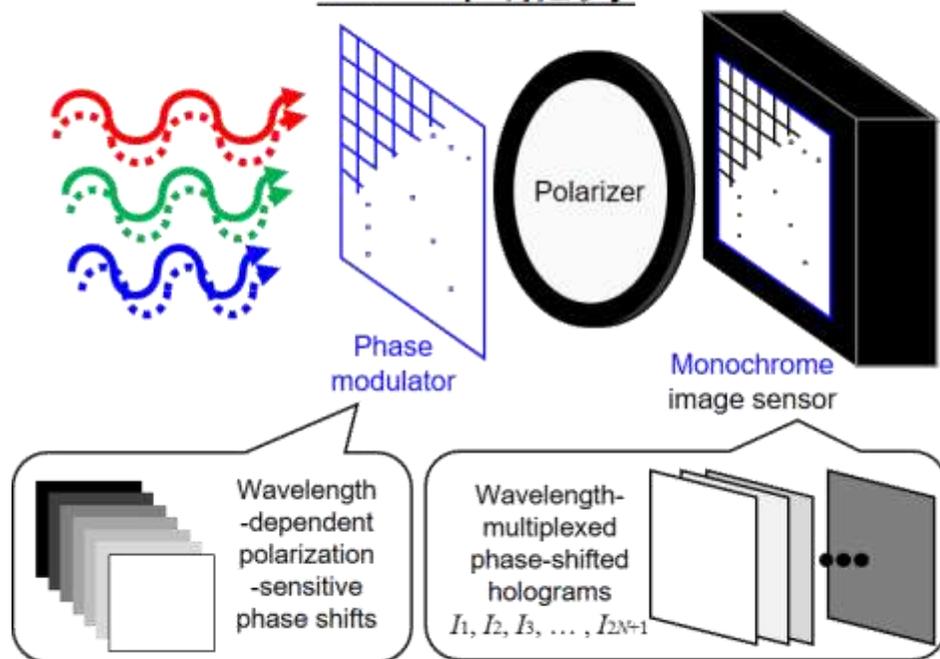
試料: 蛍光染色されたHeLa細胞

複屈折レンズを使用 ( $f = 180$  mm)

時間分解能を高めるために、複数種類の波長多重ホログラムを単一露光で同時記録

[Opt. Lett. 45 \(2020\) 2482.](#)

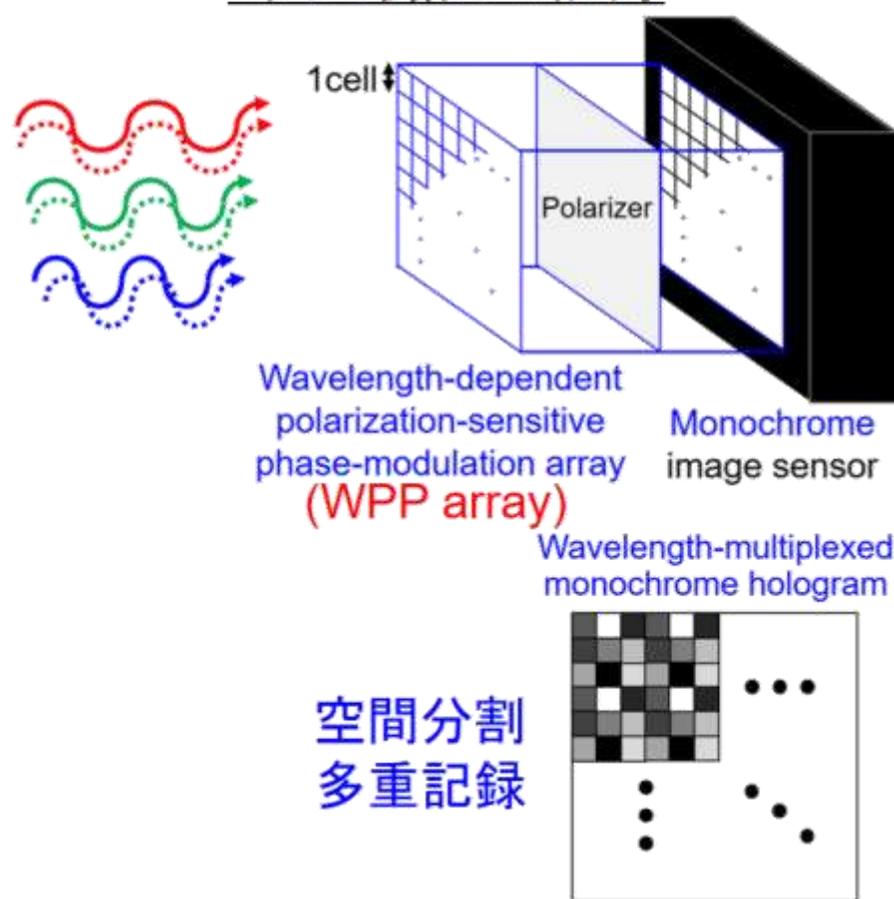
2N+1回記録



- 大きな空間情報容量
- 多数回の記録

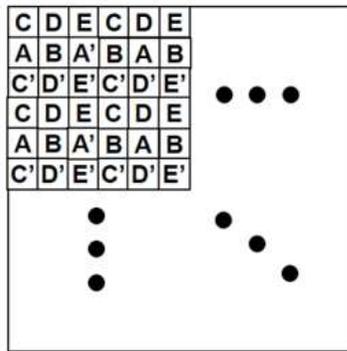
[Appl. Phys. Lett. 117 \(2020\) 031102.](#)

1回の露光で記録

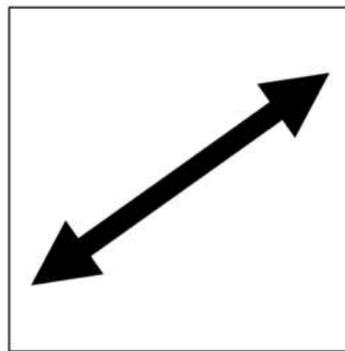


時間分解能を高めるために、複数種類の波長多重ホログラムを単一露光で同時記録

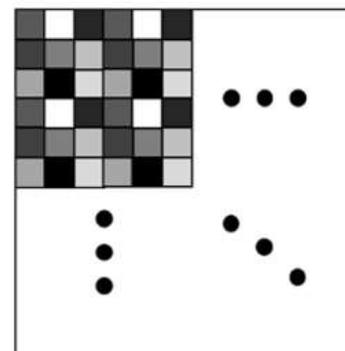
位相変調量に  
波長依存性のある  
波長板アレイ



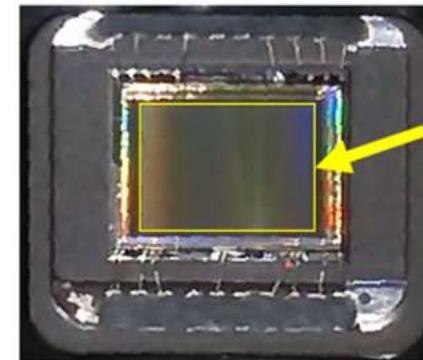
偏光子



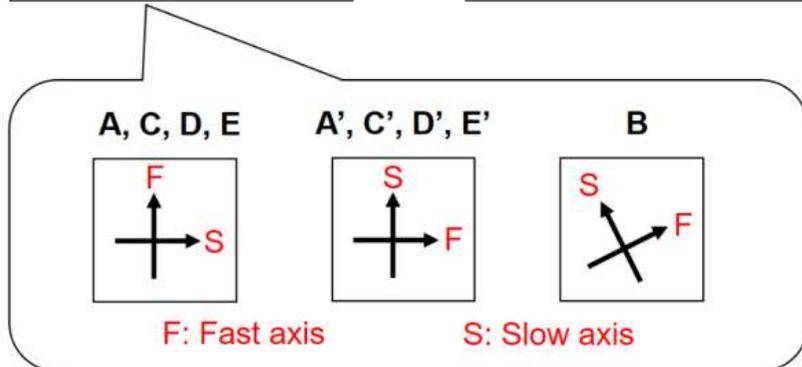
記録される  
ホログラム



試作されたイメージセンサ



WPP array on the CCD image sensor



2N+1 種類の波長多重ホログラムを  
単一露光で同時記録

# 単一露光CCS – 自然な光を用いた 3D + $\lambda$ + $t$ センシング技術 –

[Appl. Phys. Lett. 117 \(2020\) 031102](#)

系全体の倍率: 13

対物レンズの開口数: 0.95

9種の波長多重ホログラムを単一露光で同時記録

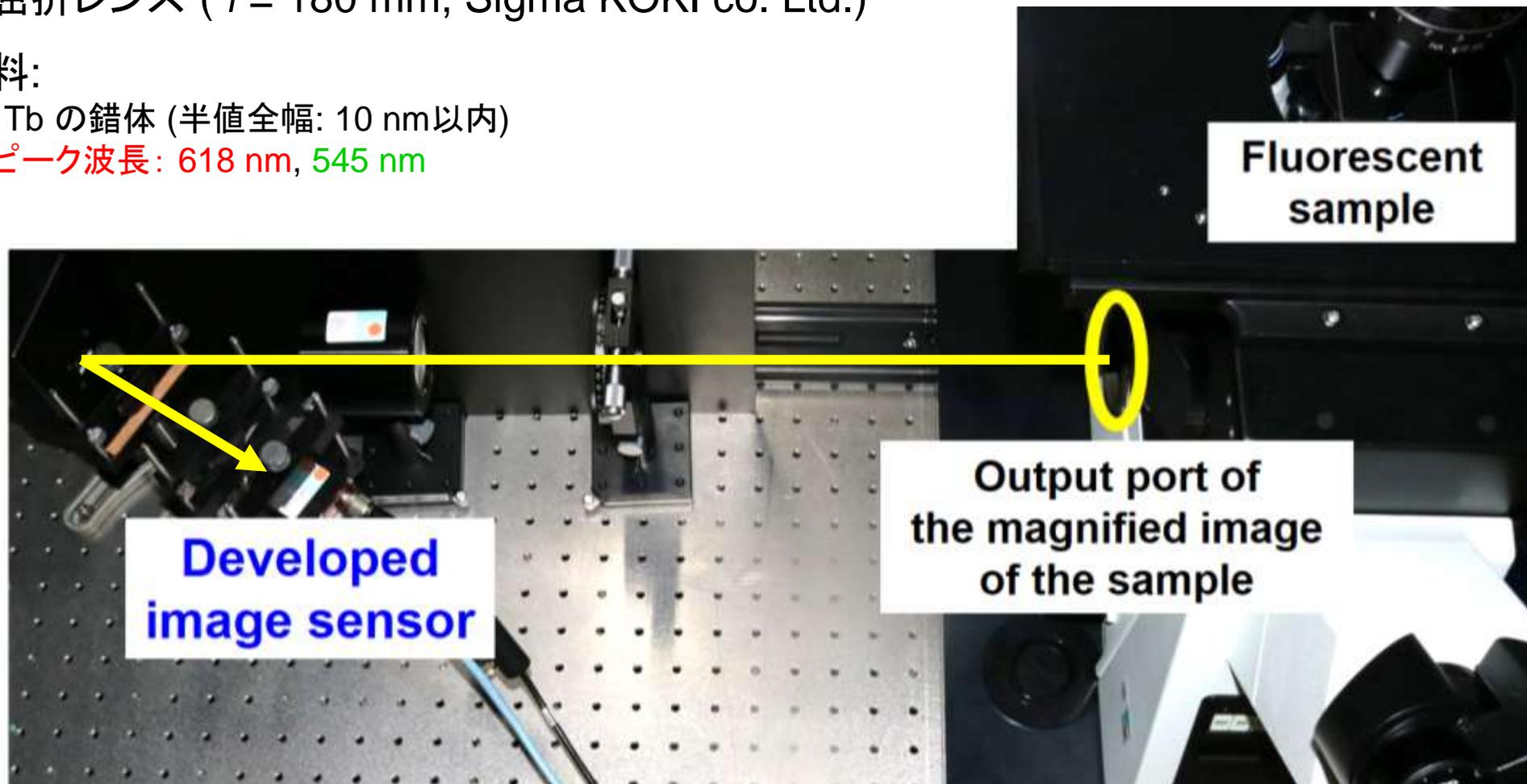
励起光のみをカットするためにダイクロイックミラーを配置

複屈折レンズ ( $f = 180$  mm, Sigma KOKI co. Ltd.)

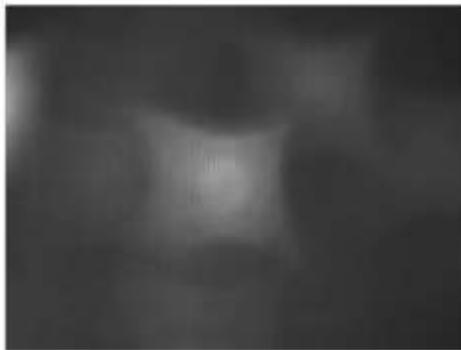
試料:

Eu, Tb の錯体 (半値全幅: 10 nm以内)

- ピーク波長: 618 nm, 545 nm

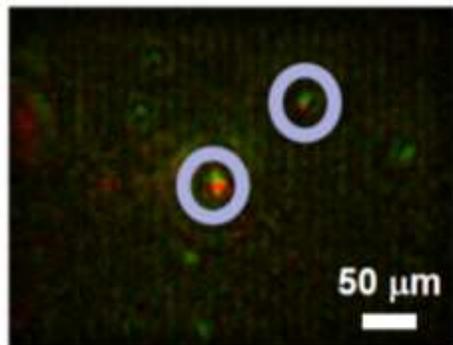


記録された  
ホログラム

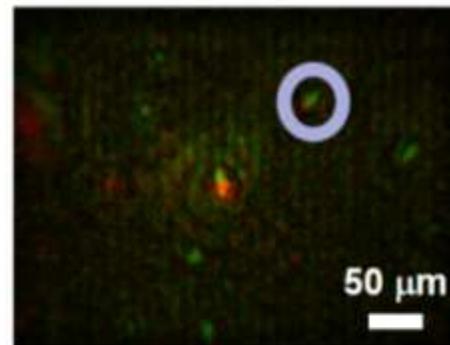


2種の微小な多数蛍光体の、単一露光、同時、  
カラーホログラフィック顕微鏡イメージングを  
実証

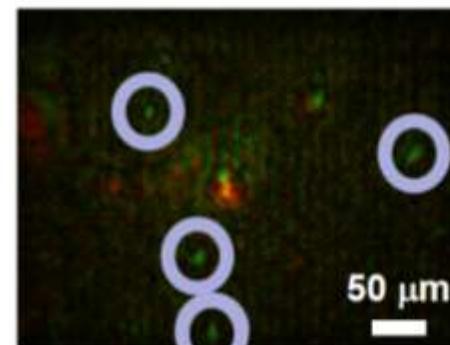
Depth: 20.7  $\mu\text{m}$



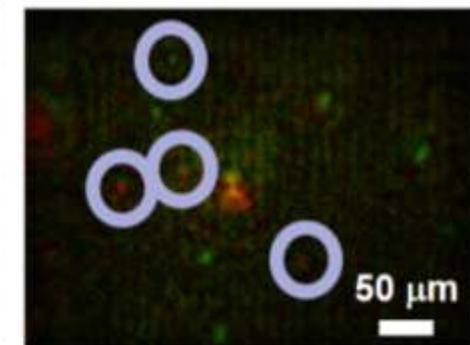
Depth: 23.7  $\mu\text{m}$



Depth: 26.6  $\mu\text{m}$



Depth: 29.6  $\mu\text{m}$



記録された  
ホログラム



ハロゲンランプを用いた単一露光マルチカラー  
ホログラフィックイメージングも併せて実証

Object at depth 1



Object at depth 2



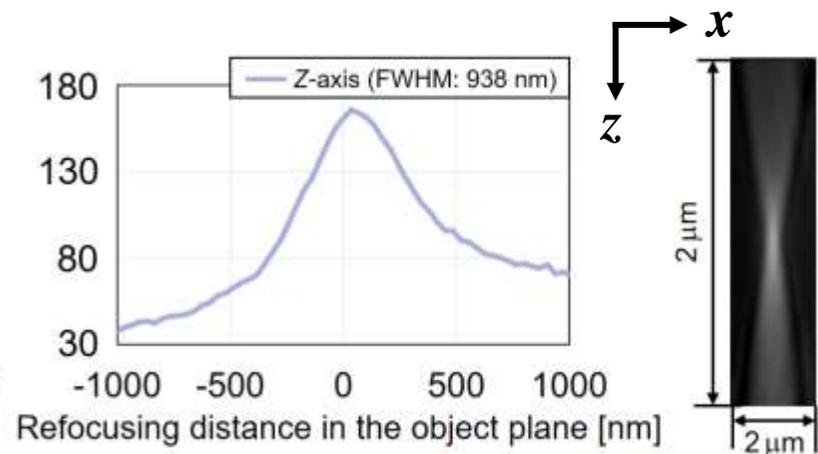
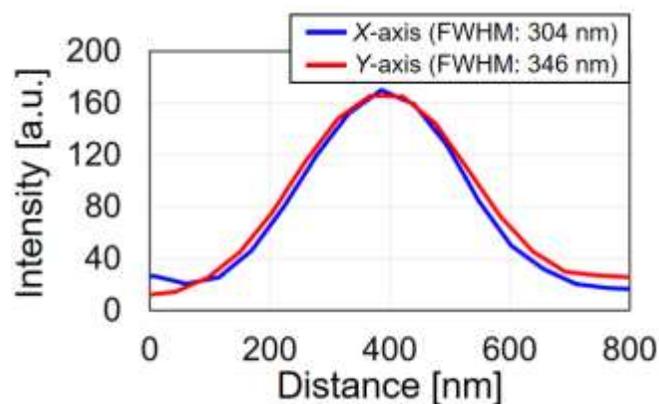
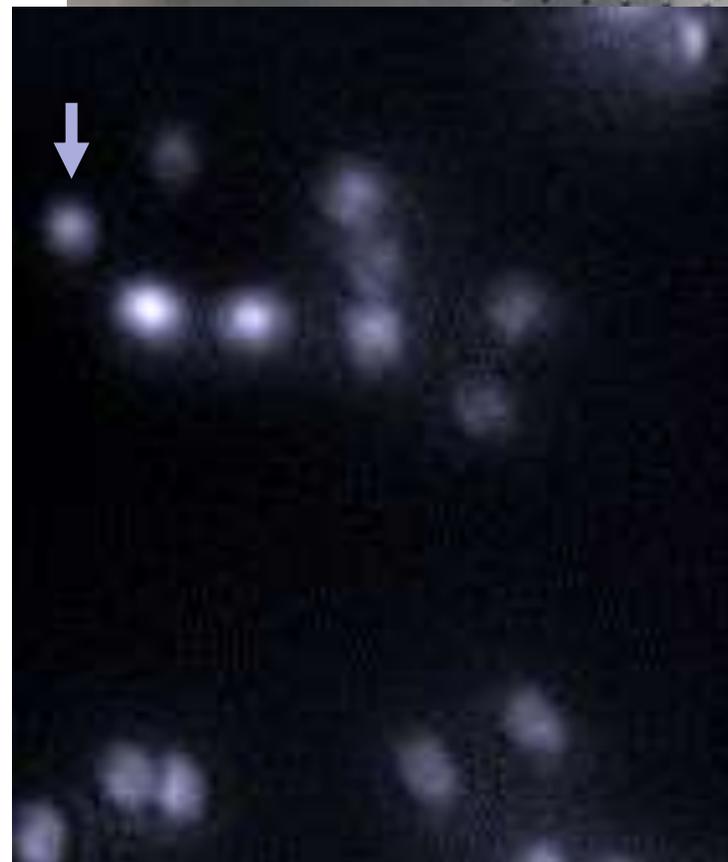
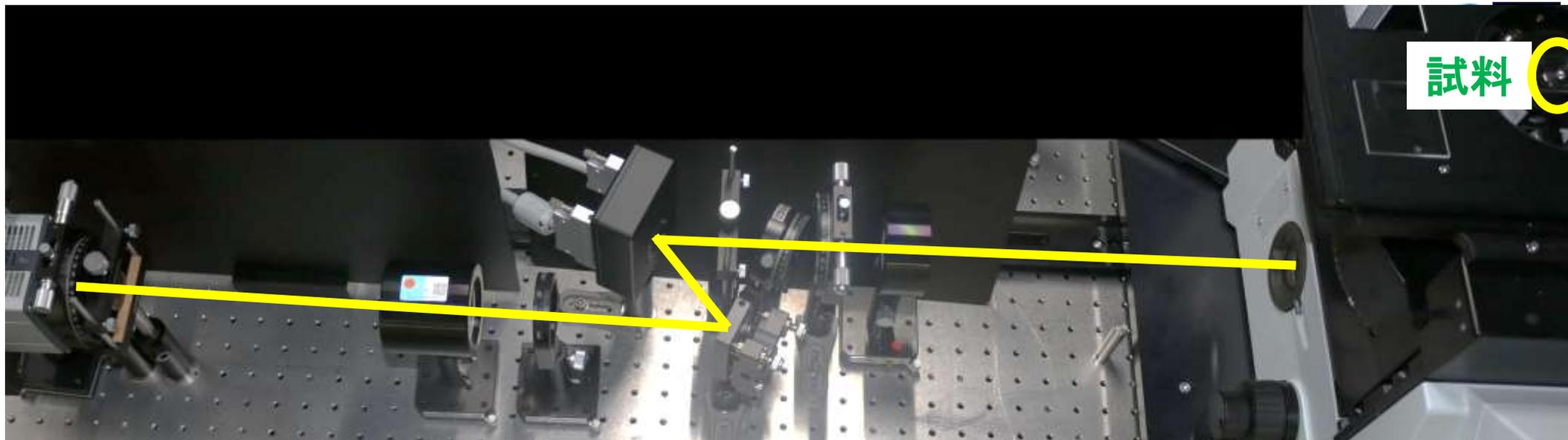
Image at depth 1



Image at depth 2



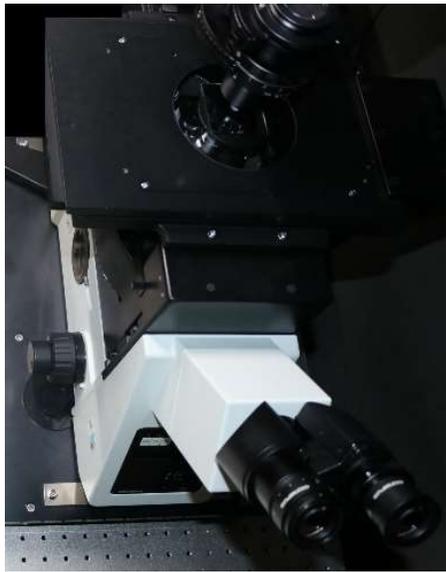
# 蛍光ナノ粒子の2回露光ホログラムセンシング



面内分解能  $0.35 \mu\text{m}$ , 奥行分解能  $0.94 \mu\text{m}$  で  
多数蛍光ナノ粒子(粒径  $0.2 \mu\text{m}$ )を同時に  
3次元計測するホログラフィック3Dナノ顕微鏡

# 現在の光学顕微鏡と、現時点と将来に目指す ホログラフィック3D顕微鏡の形

現在の光学顕微鏡  
(2D顕微鏡)

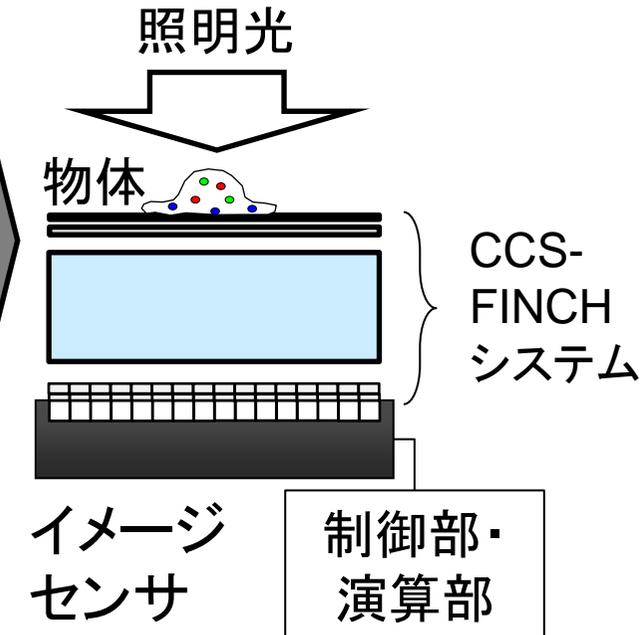


現時点の自然光DH顕微鏡  
(3D顕微鏡)

[T. Tahara, A. Ishii, T. Ito, Y. Ichihashi, and R. Oi,](#)  
*Applied Physics Letters* **117**, pp.031102-1-5 (2020).



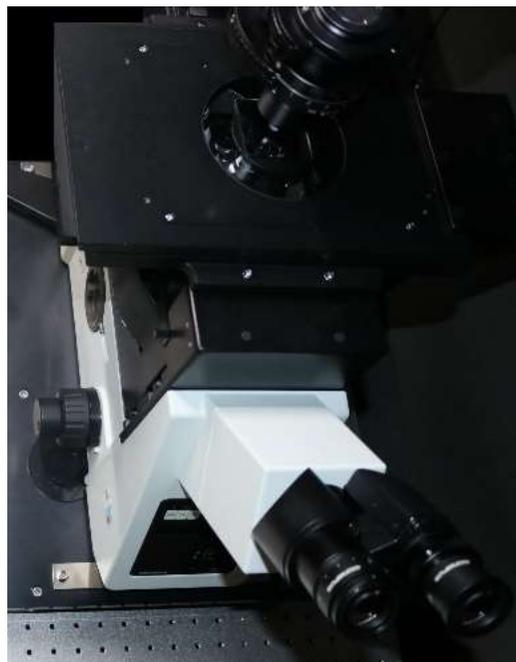
将来に目指す  
3D顕微鏡



- ・ 自然光DHを活用することで、多次元 (3D+時間+波長)計測するだけでなく  
顕微鏡の形を根本的に変えることが可能
- ・ 現時点の自然光DH顕微鏡を集積化することで、将来に目指す顕微鏡を実現可能

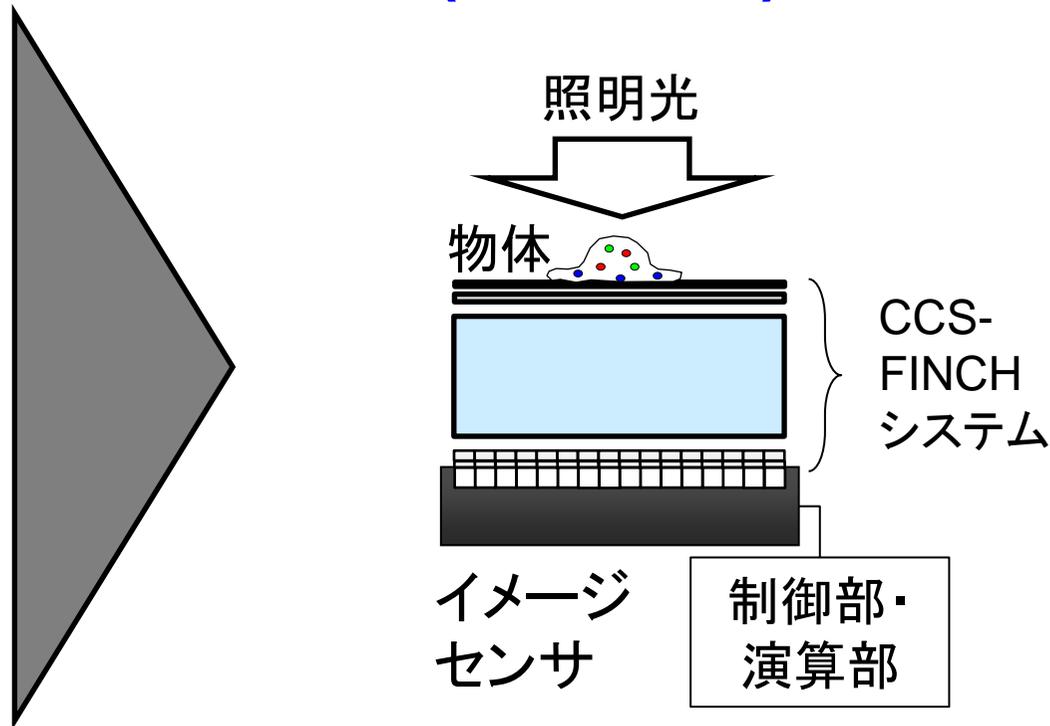
# 現在の光学顕微鏡と、現時点と将来に目指す ホログラフィック3D顕微鏡の形

## 現在の光学顕微鏡



研究施設，医院には置くが，大型...  
限られた数のユーザ  
レンズを通してのぞき込んで観察

## 自然光DH顕微鏡 (3D顕微鏡)



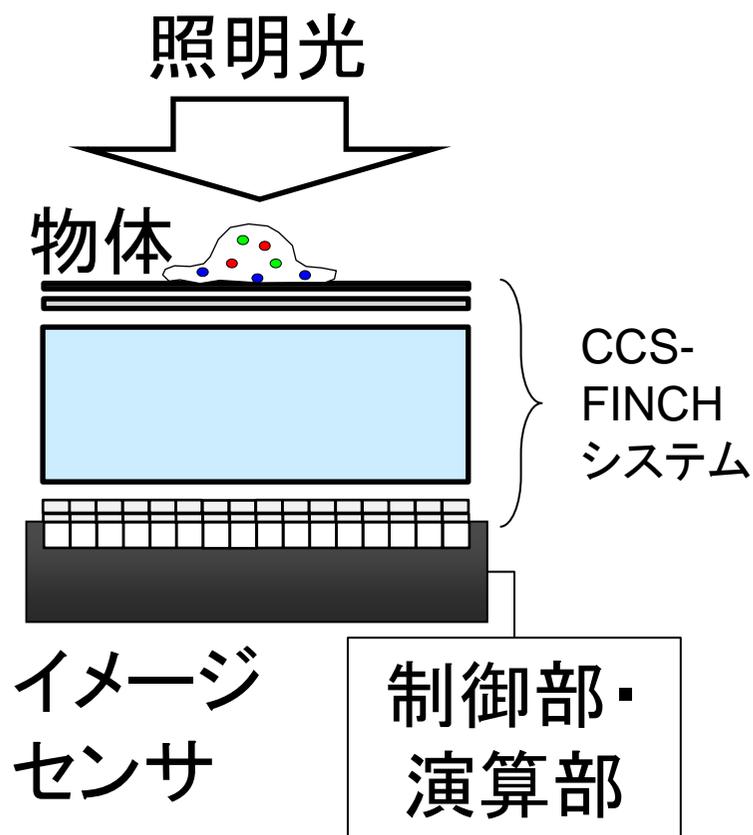
- ・手のひらサイズ，家にも容易に設置
- ・試料を置くだけでOK，ピント合わせ不要，試料の自由な動きを3D動画で観察

顕微鏡の形，使い方が根本的に変わる(はず)

# 実現に向けた課題と企業への期待

## コンパクトな顕微鏡装置への実装全般

- (例えば) 単一露光CCS法やCCS-FINCHの光学システムのコンパクト化
- 適合するイメージセンサの選定
- 制御部, 演算部の設計, GPU等への実装
- 位相変調量に波長依存性のある波長板アレイ, 位相変調器には, 何が実用上適しているのか?



形にする上でのご協力を企業の皆様  
お願いいたします

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 像再生装置、ホログラム記録装置、およびデジタルホログラフィ装置
- 出願番号 : 特願2020-152433
- 出願人 : 国立研究開発法人情報通信研究機構
- 発明者 : 田原樹

# お問い合わせ先

**国立研究開発法人情報通信研究機構  
知財活用推進室**

**TEL 042-327-6950**

**FAX 042-327-6659**

**e-mail [ippo@ml.nict.go.jp](mailto:ippo@ml.nict.go.jp)**