

# コンタクトイメージングにおける 細胞による屈折変位量の可視化

西川 雅清<sup>1,a)</sup> 船富 卓哉<sup>1</sup> 田中 賢一郎<sup>1</sup> 久保 尋之<sup>1</sup>  
澤田 好秀<sup>2</sup> 加藤 弓子<sup>2</sup> 向川 康博<sup>1</sup>

**概要:** 我々は、イメージセンサ上に直接被写体を置き、上部の点光源により被写体を照らして撮影するコンタクトイメージングを用いたレンズレス顕微鏡を開発している。本研究では、コンタクトイメージングにおいて、観察対象である細胞の表面形状や内部構造の観察を容易にするため、細胞での光線の屈折による変位量を撮像する手法を提案する。屈折変位量とは細胞表面への入射角度に応じて生じる屈折現象を主要因とする光線の変位量であり、観察時にこの情報を提示することで細胞の立体構造の把握の新たな手助けになると考えられる。点光源と細胞の間に挿入したストライプマスクをシフトさせながら撮影した入力画像群を用いて、イメージセンサ上での光線が到達する位置の変動を求め、屈折変位量を算出する。コンタクトイメージングを模した環境での実験により屈折変位量が算出できることを確認し、屈折変位量を疑似色で可視化した。さらに、実際のコンタクトイメージングの環境で撮影したウニの受精卵に対して実験を行い、提案手法の有効性を検証した。

## 1. はじめに

これまでの細胞の観察では、恒温器と呼ばれる温度を任意の設定に保つ装置の中に細胞を保管して培養し、観察する際に細胞を取り出して、顕微鏡などで観察する方法が一般的である。しかしながら、細胞の取り出しという過程を経ることにより、細胞自体を傷つけてしまう危険性が指摘されている。そこで、我々は恒温器の内部に設置可能な小型の観察装置であるレンズレス顕微鏡を開発している [11]。この新たな観察装置はコンタクトイメージングという手法を採用し、レンズを省くことによって小型化を実現している。コンタクトイメージングでは、イメージセンサの上に直接観察対象である細胞を乗せ、上部から光源で照らして撮影を行う。

レンズレス顕微鏡の実用化に向けて、國吉らは任意の深度の細胞を観察するためのリフォーカシング技術、直接光と大域光を分離することにより観察時の視認性の向上を図った高周波照明法の適用 [12] を提案した。これより、イメージセンサの平面に投影される細胞の像を鮮明に観察することができる。細胞を観察する目的の一つである細胞の良否の判定では、細胞分裂の観察や細胞自体のハリを評価

する過程が存在し、その段階では細胞の表面形状や内部の構成が非常に重要な判断要素となるが、その観察が十分にできるようになったとはいえない。

そこで、本稿ではコンタクトイメージングにおける細胞の表面形状や内部構造を観察する手助けとするため、新たな情報として屈折変位量を提案し、これを可視化するための手法を提案する。屈折変位量は、上部からの光線と細胞表面との角度に応じて生じる屈折現象を主要因とした光線の変位量であり、間接的に細胞の表面形状を表現しているといえる。

## 2. 関連研究

國吉らはレンズレス顕微鏡の実用化に向けて、コンタクトイメージングの視認性を向上させるために、計算処理により任意の深度の焦点位置の画像を生成するリフォーカシング技術 [3], [4] とシーン中の直接光と散乱光を分離する高周波照明法 [5] を効率的に統合する手法を提案した [12]。この手法で用いられている高周波照明法では、明暗が繰り返されたパターンを投影し、位相を変えながら複数枚撮影した画像群から計算によって直接光と大域光に分離している。従来、明暗のパターンの投影にはディスプレイやプロジェクタが使用されてきたが、コンタクトイメージングでは照明に点光源を用いているため明暗パターンを投影する機構を持たない。そこで、点光源とイメージセンサの間に

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学 〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

<sup>2</sup> パナソニック株式会社 〒 619-0237 京都府相楽郡精華町光台 3-4

<sup>a)</sup> nishikawa.masakiyo.nc9@is.naist.jp

ストライプマスクを挿入し、点光源からの光線を部分的に遮ることによって明暗パターンの投影を実現している。

本研究では、視認性の向上とは異なるアプローチにより細胞の観察の手助けを目指す。これまでの通常の撮影方法では得られない細胞の表面形状を反映する情報を取得し、複数細胞による構造の把握の一助とする。

最も単純な細胞の形状の推定手法として、細胞が固定された平面に対して探針が走査し、その上下運動を記録する方法がある [1]。しかし、一般的にこのような装置は恒温器の中に設置できるほど小型ではない。

細胞のような透明媒体の分布を推定する方法として、空間中の密度の違いから起こる屈折による影を可視化するシャドウグラフ法やシュリーレン法 [7] といった光学的な手法が提案されてきた。しかし、これらの手法は一般に大型の光学機器を必要とし、厳密な機器の較正が必要となる。ライトフィールドプローブを用いて、より簡易に透明物体の屈折量を計測する手法 [9] や形状を計測する手法 [10] も提案されているが、細胞の撮影に適用できるほどの小型化は困難である。

一方、透明物体の形状計測においては、グレイコード法 [2] や、位相シフト法 [6] を用いて屈折量を計測し、透明物体の形状を復元する手法が多く存在する [8]。本研究では、これらの手法に用いられているアイデアを参考に、コンタクトイメージングに適用可能なセッティングで実現できるストライプマスクのシフトのみを用いて、屈折変位量の可視化を行う。

### 3. 提案手法

本章では、まず、コンタクトイメージングの構成について述べ、その後、屈折変位量とその可視化手法について述べる。

#### 3.1 コンタクトイメージング

コンタクトイメージングでは、マイクロレンズやカラーフィルタを取り除いたイメージセンサの上に観察対象である被写体を直接置き、点光源で上部から照らして撮影を行う。レンズを使用しないため小型化が容易である。コンタクトイメージングの初期プロトタイプの様式図を図 1、コンタクトイメージングにより撮影されたウニの受精卵の画像を図 2 に示す。

#### 3.2 細胞による屈折変位量

コンタクトイメージングでは光源からイメージセンサに向けて光線を照射する。細胞に光線が照射したときの様式図を図 3 に示す。細胞に光線が入射すると、細胞と周囲の培養液との屈折率の違いにより屈折現象が生じ、細胞表面への入射角度に応じた方向に屈折光が進む。これにより、イメージセンサ上では、本来光線が到達すべき位置と実

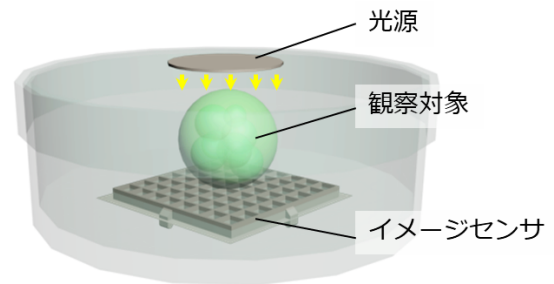


図 1 コンタクトイメージングの様式図。



図 2 コンタクトイメージングにより撮影されたウニの受精卵。

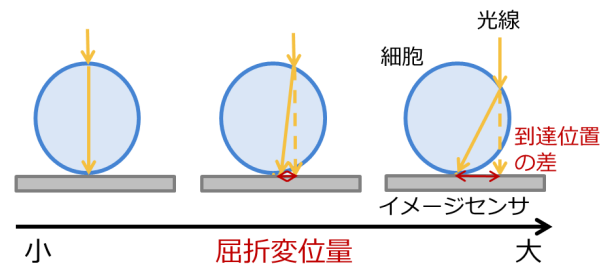


図 3 細胞表面の角度に応じる屈折変位量の違い。

際に光線が観測される位置に差が生じる。この差を屈折変位量と定義する。細胞は直上から照らされているとすると、屈折変位量は細胞表面の角度を反映しているといえる。つまり、細胞の中心近くに光線を照射した場合には、細胞表面に対してほぼ垂直に光線が入射するため、屈折した際の角度も小さくなり、屈折変位量も小さくなる。一方、細胞の輪郭付近に光線が入射した場合、屈折の角度は大きくなるため屈折変位量も大きくなる。

すべての画素について屈折変位量を算出し、屈折変位量を反映した画像を生成すれば、細胞の立体的な構造の情報を間接的に画像に付与することができる。

#### 3.3 屈折変位量の算出

まず、屈折変位量を算出するための撮影方法について述べる。屈折変位量を算出するためには、本来の光線の到達位置と実際の観測位置を知る必要がある。そのためには、画素 1 つ 1 つに対して光線を照射し、そのたびにイメージセンサで撮影された画像から光線の観測位置を求める方法が最も単純である。しかし、この方法ではイメージセンサの解像度に依存して撮影時間が長くなり、現実的ではない。

そこで、先行研究で用いたストライプマスクを利用する。

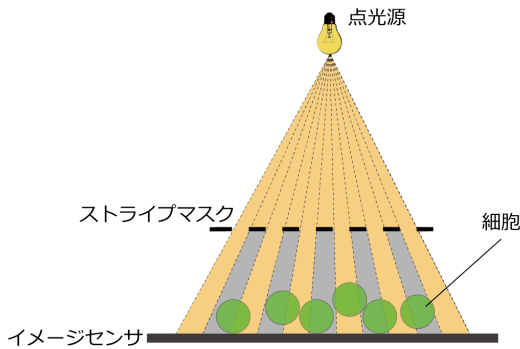


図 4 ストライプマスクをイメージセンサと点光源の間に挿入したコンタクトイメージングの模式図。

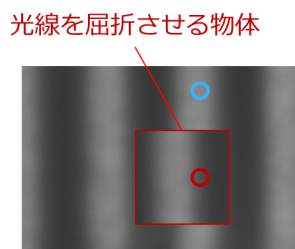


図 5 光線を屈折させる物体が存在する場合に撮影されるマスクパターン。

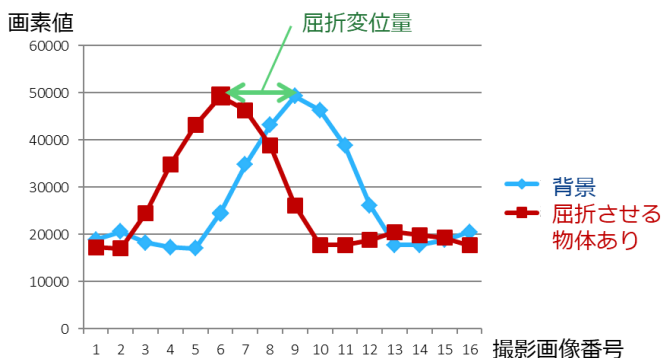


図 6 画素値のプロファイル。

ストライプマスクを挿入した撮影の模式図を図 4 に示す。点光源とイメージセンサの間にストライプマスクを挿入して撮影された画像には、明るい箇所と暗い箇所が交互に現れる画像が得られる。このパターンが投影された画像中に細胞のような屈折現象を生じる物体が存在する場合、図 5 のような画像が撮影される。屈折させる物体が存在しない背景部分では投影されたマスクパターンが観察できる。一方、光線を屈折させる物体が存在する部分では、背景のマスクパターンから屈折方向にずれたパターンが観測される。

さらに、マスクをストライプと直交する方向に移動させながら撮影を行うと、撮影のたびに投影されたパターンも移動していく。このとき、ある 1 点の画素の画素値を、縦軸を画素値、横軸を撮影した画像の番号としてプロットすると、図 6 のようなプロファイルが得られる。図 6 には屈折させる物体が存在する箇所の 1 つの画素値のプロファイ

ルと、ストライプ方向に同じ軸の背景の 1 画素（画像中では Y 軸が同じ背景画素）のプロファイルを表示している。図 6 を見ると、プロファイルには投影されたマスクの明暗が現れており、2 つのプロファイルの形状に大きな違いはないが、横軸方向にシフトしている。背景画素のプロファイル（以下、基本プロファイルと呼ぶ）は本来の光線の到達位置（本来のパターンの明暗）とみることができるので、屈折を起こす物体が存在する位置のこの画素の屈折変位量は、この 2 つのプロファイルの横軸の位置の差（シフト量）として算出される。

プロファイルのシフト量を求める方法には、相互相関を利用する。基本プロファイルを固定して、求めたい画素のプロファイルを横軸方向に移動させ、移動のたびに 2 つのプロファイルの相関係数を求める。2 つのプロファイルの形状が大きく変化していないとすると、相関係数が最大となる横軸の位置では基本プロファイルと最も重なるため、本来の照射位置であると考えられる。よって、相関係数が最大となった横軸の位置と初期の横軸位置の差が、求めたい画素のプロファイルのシフト量となる。屈折変位量を推定するための式を式 (1) に示す。

$$\Delta(c) = \operatorname{argmax}_d C(p_b, p_d(c)), \quad (1)$$

ただし、 $\Delta(c)$  はカメラピクセル  $c$  における推定された屈折変位量、 $d$  はシフト量、 $C$  は相関関数、 $p_b$  は基本プロファイル、 $p_d(c)$  はピクセル  $c$  における  $d$  シフトした時のプロファイルである。

### 3.4 明るさ推定方法

以上の方法により、屈折変位量という新たな情報を得ることができる。この屈折変位量という情報は、これまで得られていた細胞の像と重ねて提示することにより、より効果的な観察を実現できると考えられる。しかし、屈折変位量の算出に用いられる画像にはストライプマスクが投影されており、この入力画像と重畳表示すると投影されたマスクパターンも同時に表示される。このマスクパターンは細胞観察に不必要である。また、別のタイミングでストライプマスクを取り外して撮影した画像と重ねて表示すると、移動や成長などで細胞の像が変動しており、同じ位置に重畳表示することはできない可能性が高い。

細胞の像は、ストライプマスクを挿入していない状態でのイメージセンサで観測される明るさを画像化したものであると考えることができる。そこで、屈折変位量の算出に用いた入力画像群から新たに各画素の明るさを推定する。

ストライプマスクを移動させながら撮影した入力画像群から、各画素のプロファイルが得られている。このプロファイルには投影されたマスクの明暗が表れている。明るい部分は、背景であれば光源の明るさがほぼそのまま観測

されるが、細胞などが存在すると光線の減衰などにより強度が低下する。明るさとして推定したい値が光線の強度の低下の度合いであるとすると、ある画素の明るさはその画素のプロファイルの明暗の差により表現することができると考えられる。本稿では、明るさ推定に標準偏差を利用する。ある1画素の明るさの推定値を  $I$  としたときの、明るさ推定方法を式 (2) に示す。

$$I = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

ここで、 $n$  は撮影枚数、 $x_i$  は  $i$  番目の撮影画像における画素値、 $\bar{x}$  は画素値の平均値である。画素の明るさは、各画素独立に計算できる。

標準偏差を利用することでプロファイル全体のばらつきを考慮することができるため、プロファイルに不適切なピーク値が含まれる場合でも安定した明るさを推定することができる。

### 3.5 屈折変位量と明るさの可視化と重畳表示

細胞の観察時に算出した屈折変位量を新たな判断材料として導入するため、屈折変位量に疑似色を割り当て可視化する。屈折の度合いを表現するために、屈折変位量が大きくなるにつれて彩度が高い疑似色を割り当てる。また、屈折の方向を見分けるために、屈折変位量の正負によって異なる色相を割り当てる。ただし、明暗が繰り返されるストライプのパターンを投影しているため、この繰り返し幅以上の変位量となる場合は位相のラッピング問題が発生する。これに対応した可視化とするため、循環する色付けを採用する。

一方、推定した明るさには明度を割り当てる。つまり、推定した明るさが大きい画素については白く、小さい画素については黒い画像となる。

上記の2つの可視化方法は、HSV による画像表現を用いることで、新たな計算の必要なく簡単に組合わせて画像化できる。HSV 画像には色相、彩度、明度の3つの要素が存在し、色相と彩度に屈折変位量、明度に推定された明るさを割り当てることができる。

## 4. 模擬環境での実験

提案手法により屈折変位量を算出できることを確認するため、コンタクトイメージングを模した実験を実施した。本章では模擬環境での実験の方法と撮影環境、その結果について述べる。

### 4.1 撮影環境

コンタクトイメージングを模した実験環境として、図7に示す環境を構築した。実際に構築した撮影環境の写真は

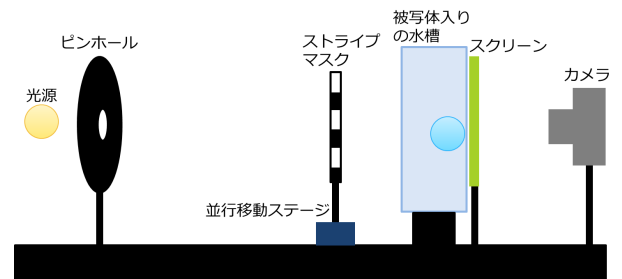


図7 コンタクトイメージングを模した撮影環境。

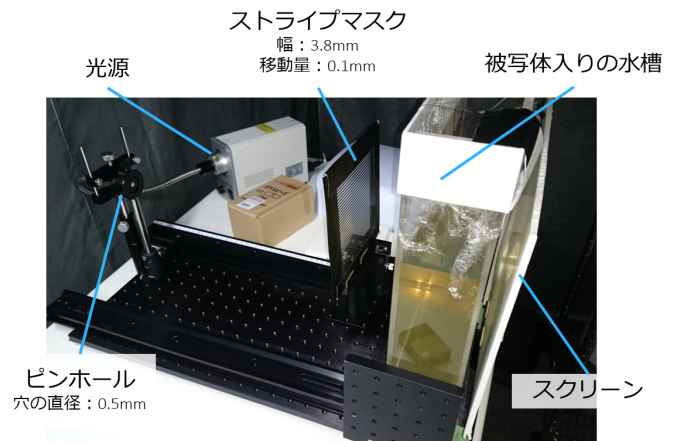
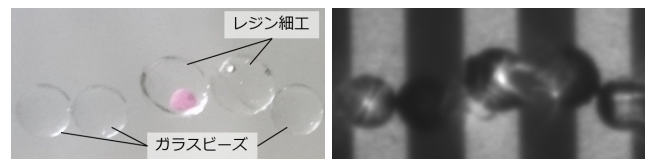


図8 実際の撮影環境。



(a) ガラスビーズとレジン細工。(b) 模擬環境での撮影画像例。

図9 ガラスビーズとレジン細工の撮影対象物体。

図8である。点光源とみなすために光源の前に穴の直径0.5mmのピンホールを設置する。光源で照らす先に細胞を模した被写体を入れた水槽を設置している。被写体を通常のカメラで撮影した写真を図9(a)に示す。被写体には屈折を起こす物体として直径約5mmのガラスビーズとレジン細工を採用した。水槽の後に設置されたスクリーンに投影された像をカメラで撮影することで、コンタクトイメージングでの撮影と条件を揃えている。そして、ストライプパターンを投影するために光源と水槽の間にストライプマスクを挿入している。ストライプマスクにはOHPシートにレーザープリンタで黒を印刷したものを使用し、スリット幅は3.8mmとした。カメラにはNikon D5500を使用する。

実験では、投影するストライプマスクを横方向にシフトさせながら撮影を行う。撮影ごとのストライプマスクの移動量は0.1mmとした。カメラのシャッタースピードを4秒、ISO感度を100、F値を1.4に設定して105回撮影を行った。撮影された入力画像の一例を図9(b)に示す。

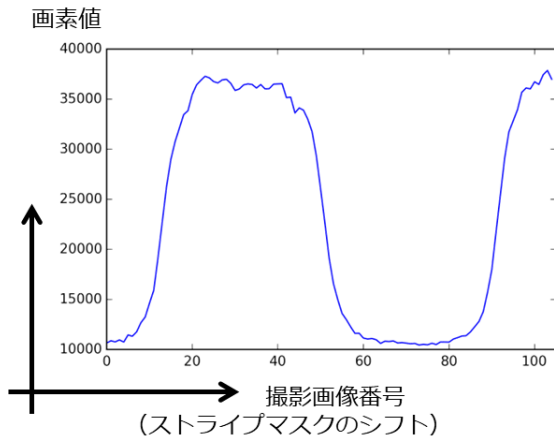


図 10 入力画像群の左上画素のプロファイル。

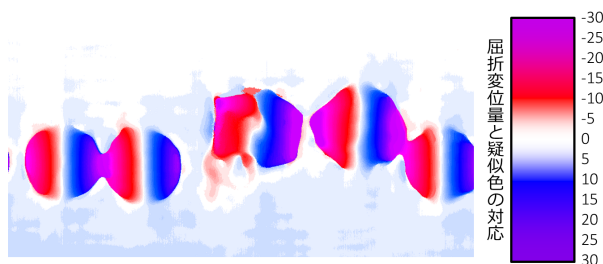


図 11 模擬環境での実験の屈折変位量可視化結果。

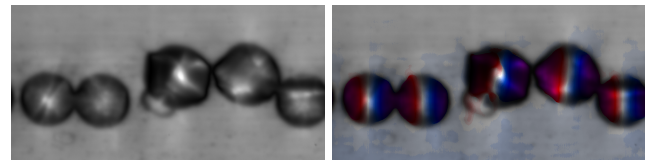
## 4.2 屈折変位量の可視化

屈折変位量を算出するにあたって、プロファイルの調査を実施した。図 9 (b) における左上の位置の画素のプロファイルを図 10 に示す。プロファイルではマスクの明暗が見て取れる。なおかつ明るい箇所と暗い箇所の画素値の差も十分に得られていることから、本手法を適用可能な入力画像群が得られていることを確認した。

入力画像群の各画素においてプロファイルを作成し、画像上部の背景画素を本来の光線到達位置である基本プロファイルとして、屈折変位量を算出した。算出した屈折変位量に疑似色に割当て、画像として可視化した。屈折変位量を可視化した結果の画像を図 11 に示す。

図 11 右に示すカラーバーが屈折変位量と疑似色の対応関係を表している。カラーバーの右に示す屈折変位量の値が大きいほど屈折の度合いが大きく、正負で屈折の方向を示している。ここでの可視化方法では、屈折変位量が大きいほど彩度を大きく、屈折の方向それぞれに赤と青を割り当て、赤と青の間を紫とすることでカラーバーが循環するようにしている。

図 11 のガラスビーズに対する屈折変位量の可視化結果では、中央部は屈折が発生せず屈折変位量も小さいため白で描画されている。球の左右に行くに連れて入射する光線に対する表面の角度が大きくなるため、左側が赤く、右側が青く色付けされている。これにより画像の横方向に対して球面であることが見て取れる。また、画像中央のレジ



(a) 提案手法による明るさ画像。 (b) 重畳画像。  
図 12 明るさ画像と、屈折変位量の重畳表示結果。

細工では、内部に色付きのガラスビーズが内包されているため単純な光路ではないことから、色付けが乱れている。

この結果から、ガラスビーズの球面の角度に応じて色付けされており、屈折変位量が正しく算出されることを確認した。ただし本実験でのセッティングでは、ストライプマスクのスリット方向が縦方向であったため、画像での横方向の屈折変位量しか算出することができない。

## 4.3 明るさ推定

4.1 節で撮影した入力画像に対して、提案する明るさ推定手法を適用した結果を図 12 (a) に示す。ガラスビーズの像が画素値の強度として観測できることがわかる。続いて、明るさ推定結果の画像と屈折変位量可視化結果の疑似色画像との重畳表示した画像を図 12 (b) に示す。

ガラスビーズの像と疑似色が適切な位置で重畳表示されることが確認できた。

## 5. 実際のコンタクトイメージングへの適用

実際の細胞と開発中のレンズレス顕微鏡のプロトタイプを用いた実験について述べる。

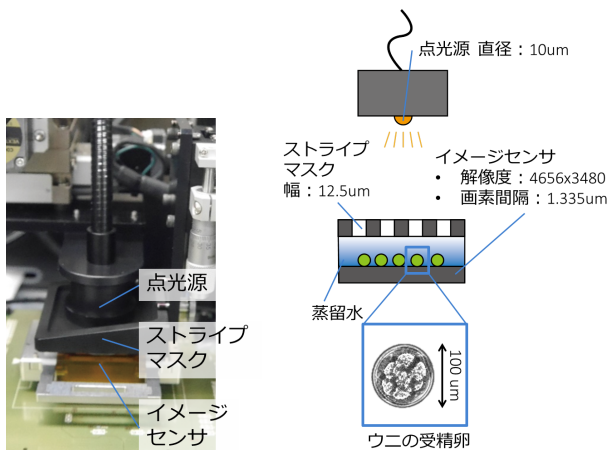
### 5.1 撮影環境

実験に使用したレンズレス顕微鏡のプロトタイプの画像を図 13 (a)、横から見た模式図を図 13 (b) に示す。下部のイメージセンサの上に直接ウニの受精卵が乗っており、その周囲を蒸留水で満たしている。その上にストライプマスクを重ね、上部から点光源で照らしている。イメージセンサの解像度は  $4656 \times 3480$ 、画素間隔は  $1.335 \mu\text{m}$  であり、受精卵の直径は約  $100 \mu\text{m}$  である。ストライプマスクのスリット幅は  $10 \mu\text{m}$ 、点光源の直径は  $10 \mu\text{m}$  となっている。このプロトタイプでは設計上ストライプマスクを移動させることが困難であるため、点光源の移動により投影されるマスクパターンをシフトさせている。

点光源を  $10 \mu\text{m}$  間隔で移動させながら 90 回撮影を行った。撮影された画像の一例を図 14 に示す。

### 5.2 屈折変位量の可視化

模擬環境での実験と同様にプロファイルの調査を実施した。入力画像の左上の画素のプロファイルを図 15 に示す。プロファイル中にマスクパターンの明暗が表れ、十分な画素値が得られていることを確認した。ただし、プロファイ



(a) プロトタイプ. (b) 構成の模式図.

図 13 実験に使用したレンズレス顕微鏡の構成及びプロトタイプ.

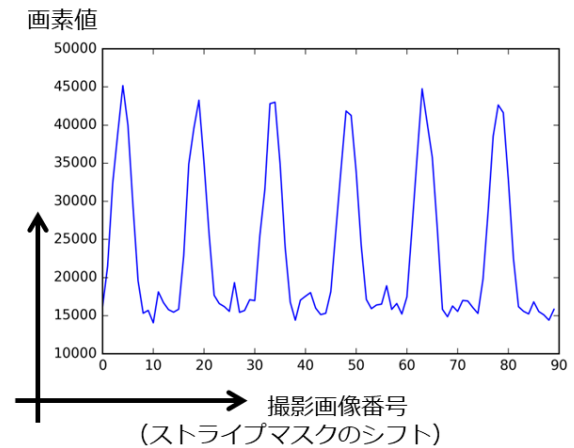


図 15 入力画像群の左上画素のプロファイル.

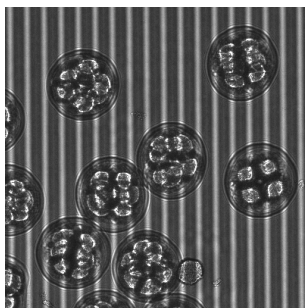


図 14 レンズレス顕微鏡で撮影された細胞の画像の一例

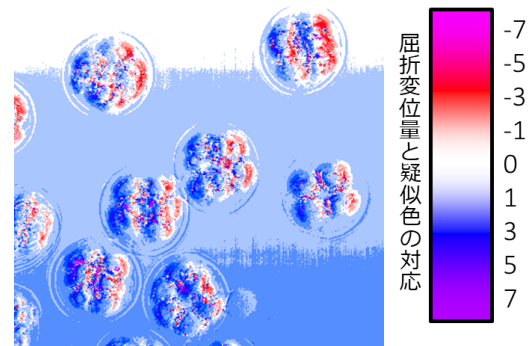


図 16 屈折変位量の可視化結果.

ルの暗い部分が理想的な谷の状態になっていない。これは、ストライプマスクのスリット幅が非常に小さくなったことで、回折の影響が現れたためであると考えられる。ただし、プロファイルの変形はパターンの明暗に比べて小さいので、相互相関を用いることでプロファイルの変形の影響を吸収して屈折変位量を算出できると考えられる。

入力画像群の各画素においてプロファイルを作成し、画像上部の背景画素を本来の光線到達位置である基本プロファイルとして、屈折変位量を算出した。屈折変位量を疑似色で可視化した結果の画像を図 16 に示す。まず、細胞などが存在しない背景画素について、水色や青で色付けされている。この理由としては、投影されたストライプマスクのパターンが画像の Y 軸に対して傾きを持っていたためである。本実験での本来の光線到達位置である基本プロファイルは画像最上部 (Y=0) の画素を用いている。そのため、マスクパターンに傾きがあると、画像の下部に行けば行くほどそのずれが大きくなり、影響が強く表れている。しかしながら、この傾きは撮影時のセッティングによるものであり、提案手法は想定通りの出力を示していると考えられる。

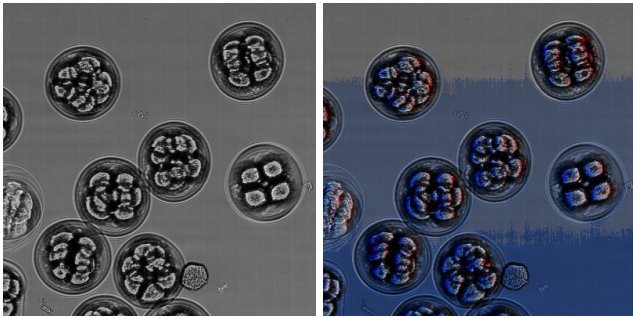
続いて、受精卵では、受精卵内部の割球と呼ばれる細胞について、左側が青く、右側が赤く色付けされる結果となった。このことから、割球は球状であることが見て取れ

る。また、受精卵の受精膜について色付けされていない理由として、受精卵の屈折率と媒質である蒸留水の屈折率に大きな差がなく、受精膜と割球の屈折率の差の方が大きいいため、後者の影響が支配的になっていると考えられる。

以上の結果から、本手法を用いることで実際の細胞に対しても屈折変位量を求められることが確認できた。

### 5.3 明るさ推定

5.1 節で撮影した入力画像に対して、明るさ推定手法を適用した結果を図 17 (a) に示す。割球周辺に割球の影が落ちていることなどから、細胞の像が画素値の強度として観測できていることがわかる。続いて、明るさ推定結果に屈折変位量の疑似色を重畳した画像を図 17 (b) に示す。細胞の像と疑似色が適切な位置に表示されることで、各割球の左側が青く、右側が赤く色付けされていることがわかる。ただし、ストライプマスクの傾きの影響によって色付けが青の方向にシフトしており、割球の右側の赤で色付けされるべき領域が減少している。明るさ画像と屈折変位量可視化画像それぞれ単体での観察に比べ、複数細胞による構造を観察しやすくなっていると考えられる。



(a) 提案手法による明るさ画像. (b) 重畳画像.

図 17 明るさ画像と、屈折変位量の重畳表示結果.

## 6. おわりに

本稿では、細胞の構造を観察する際の手助けとなる新たな情報として屈折変位量を算出し、可視化する手法を提案した。加えて、明るさを推定する手法を提案し、通常の観測と同等の細胞の像を復元しつつ、新たな情報を付加することができた。

ガラスビーズを用いた模擬環境での実験によって屈折変位量を可視化し、被写体の表面の角度に応じて色付けされることを確認した。レンズレス顕微鏡のプロトタイプと受精卵を用いた実験においても、受精卵内部の割球に色付けされることを示し、実際の細胞に対しても本手法が有効であることを確認した。加えて、模擬環境での実験と細胞に対する実験の双方で、明るさ推定手法により生成した画像との重畳表示を達成した。

本稿で可視化に成功した屈折変位量は画像での X 軸方向のみであった。これは、入力画像に投影されたストライプマスクを Y 軸方向の縞模様としたためである。同一被写体に対して、X 軸方向と Y 軸方向の 2 種の撮影を実施し、得られた 2 つの情報を組み合わせると可視化すれば、さらに情報量の多い画像を生成できると考えられる。

また、本稿の屈折変位量の可視化結果における背景画素の色づきに関しては、画像最上部のみを基本プロファイルとしたことが原因である。しかし、ストライプマスクとイメージセンサの厳密な位置関係を必要とすると、本手法の簡便性が失われる。各画素での厳密な基本プロファイルは、細胞などが存在する場合には当該画素から求めることはできないため、何らかの方法によって基本プロファイルを設定する必要がある。そこで、画像最上部と最下部が背景画素となるように撮影し、上下 2 箇所のプロファイルからその間の画素のプロファイルを推定することで、ストライプマスクの傾きに対応した手法とすることができると考えられる。これにより、投影されるストライプマスクが 1 周期以上ずれることがない程度の環境設定で、本手法をより正確にできる。

今後の展望として、上に挙げた Y 軸の情報量増加、マ

スクの傾きを考慮した手法の改良に加えて、様々な被写体を用いた本手法の検証が挙げられる。本手法は物体の屈折率の差と光線の入射角度によるものであり、細胞以外の透明物体にも適用可能であると考えられる。他の透明物体の形状推定に比べて簡便であり、広い適用範囲を持つと考えられる。様々な形状の物体に本手法を適用することで、応用可能な分野を模索するとともに実用性を評価していきたい。また、提案手法による屈折変位量の算出に相互相関を利用している効果として、ある程度のプロファイルの形状の変動があった場合でも適切にシフト量を求められることがあげられる。コンタクトイメージングでは屈折以外にも散乱や回折など様々な光学現象が発生し、その複合的な要因による最終的な光線の到達位置の変化が屈折変位量となる。これらの光学現象の影響によるプロファイルの変動に対して、相互相関が有効に働いていることを検証していきたい。

## 参考文献

- [1] Binnig, G., Quate, C. F. and Gerber, C.: Atomic Force Microscope, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 56, pp. 930–933 (online), DOI: 10.1103/PhysRevLett.56.930 (1986).
- [2] Inokuchi, S., Sato, K. and Matsuda, F.: Range Imaging System for 3-d Object Recognition, *Proc. ICPR*, pp. 806–808 (1984).
- [3] Levoy, M., Ng, R., Adams, A., Footer, M. and Horowitz, M.: Light field microscopy, *ACM ToG*, Vol. 25, No. 3, pp. 924–934 (2006).
- [4] Lin, X., Wu, J., Zheng, G. and Dai, Q.: Camera array based light field microscopy, *Biomed. opt. exp.*, Vol. 6, No. 9, pp. 3179–3189 (2015).
- [5] Nayar, S. K., Krishnan, G., Grossberg, M. D. and Raskar, R.: Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene using High Frequency Illumination, *Proc. SIGGRAPH*, pp. 935–944 (2006).
- [6] Salvi, J., Fernandez, S., Pribanic, T. and Llado, X.: A state of the art in structured light patterns for surface profilometry, *Patt. Recogn.*, Vol. 43 (2010).
- [7] Settles, G. S.: *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*, Springer (2001).
- [8] Tanaka, K., Mukaigawa, Y., Kubo, H., Matsushita, Y. and Yagi, Y.: Recovering Transparent Shape from Time-of-Flight Distortion, *Proc. CVPR*, pp. 4387–4395 (2016).
- [9] Wetzstein, G., Raskar, R. and Heidrich, W.: Hand-Held Schlieren Photography with Light Field Probes, *Proc. ICCP* (2011).
- [10] Wetzstein, G., Roodnick, D. and Raskar, R.: Refractive Shape from Light Field Distortion, *Proc. ICCV* (2011).
- [11] 加藤弓子, 澤田好秀, 國吉房貴, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博: リフォーカシングによる初期胚の自由焦点画像生成, 信学技報 (医用画像), Vol. 115, No. 401, pp. 135–139 (2016).
- [12] 國吉房貴, 船富卓哉, 久保尋之, 澤田好秀, 加藤弓子, 向川康博: コンタクトイメージングにおける視認性向上のためのリフォーカシングと高周波照明法の統合, 情報研報 CVIM 206, No. 11 (2017).