

# バイオニックヒューマノイド： 光弾性応力センサを有する生体模倣網膜モデル

Bionic Humanoid:  
Biomimetic Retina Model Having Photoelastic Stress Sensor

○正 丸山 央峰 (名大) 椿 雅樹 (名大) 正 益田 泰輔 (名大)  
正 小俣 誠二 (名大) 正 新井 史人 (名大)

Hisataka MARUYAMA, Nagoya University, hsiataka@mech.nagoya-u.ac.jp  
Masaki TSUBAKI, Nagoya University, tsubaki@mech.nagoya-u.ac.jp  
Taisuke MASUDA, Nagoya University, masuda@mech.nagoya-u.ac.jp  
Seiji OMATA, Nagoya University, s-omata@mech.nagoya-u.ac.jp  
Fumihito ARAI, Nagoya University, arai@mech.nagoya-u.ac.jp

We proposed sensor-integrated retina model with similar Young's modulus to human retina for training of ophthalmologist. Mimic of mechanical properties of human retina is important issue for surgical simulator. Moreover, integrated of sensor into model is useful for evaluation of surgeon skill. First, we fabricate eye ball model having retina and scleral with similar Young's modulus to human by adjusting the concentration of catalyst. Then, photoelastic coefficient of retinal model is increased by adding the carbon nanomaterial. As a demonstration, stress distribution on retinal model was measured using the assembled retina and sclera model in skull model having polarization optical system.

**Key Words:** Sensor, photoelasticity, stress, retina

## 1. 緒言

近年の手技や手術機器の発展に伴い、医師の技術の評価やトレーニングに対するニーズが高まっている。従来の眼科における手術トレーニングでは豚眼が用いられてきた。豚眼は、ヒトの眼に近い形状を有しているが、機械的特性が異なることや、ヒトの眼には有る内境界膜が豚眼には無い等の違いがあるといった課題があった。このため、ヒトの臓器の形状だけでなく、特性も精密に模倣した手術シミュレータについて期待が高まっている。さらに、手術技術の評価に有用なセンサを手術シミュレータに組み込むことは、トレーニングの効果を定量的に評価することが可能となる。例えば、内境界膜剥離手術のトレーニングにおいては、再生が困難な網膜への印加応力をできるだけ小さくすることが重要である。

本研究では、内境界膜剥離手術のトレーニングを目的として、ヒトの網膜のヤング率を模倣し、印加応力を光弾性を用いて計測可能な生体模倣網膜モデルについて報告する。

## 2. 光弾性応力センサを有する網膜モデル

図 1 に、眼科手術シミュレータための眼球モデルの概念図を示す。眼球モデルは、強膜、網膜、血管、内境界膜を備えている。本研究では、その中の網膜部において、ヒトの網膜のヤング率を模倣し光弾性による応力計測が可能な網膜モデルの作製を対象としている。この網膜モデルが搭載された眼球モデルを頭蓋モデルに組み込み手術トレーニングに用いる。

この頭蓋モデルには光弾性計測用の光学系が組み込まれている。光弾性応力計測用の光源としては、手術トレーニング時の照明で用いる可視光線と干渉しないように、850 nm の近赤外の平行光を用いる。近赤外光を 1/2 波長板及び 1/4 波長板を通して円偏光として網膜モデルに印加し、応力が印加された網膜モデルで、印加応力に応じて変化した位相差を偏光カメラで計測する。位相差  $\delta$  はカメラの各素子に 45° 毎の角度で偏光素子が設置されており、観察画像から 4 ステップ位相シフト法により式 1 により行う。

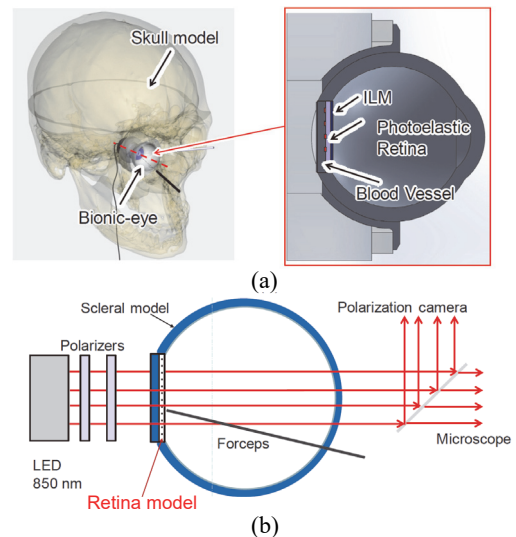


Fig. 1 A Schematic diagram of retinal model having photoelastic stress sensor and optical system. (a) Eye model. (b) Optical system for stress measurement

$$\delta = \sin^{-1} \frac{2\sqrt{(I_{90} - I_0)^2 + (I_{45} - I_{135})^2}}{I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135}} \quad (1)$$

網膜に印加される応力の算出において、CCD の各ピクセルにおける主応力差  $\sigma$  は式 2 で計算される。

$$\sigma = \frac{\delta}{\alpha \cdot t} \quad (2)$$

$\alpha$  [ $10^{-12}/\text{pa}$ ]は光弾性係数、 $t$  [cm]は光弾性物質の厚み 応力計測の分解能向上のためには、光弾性係数を向上させる必要がある。本研究では、異方性ナノカーボン材料であるカーボンナノチューブ (直径: 60-100 nm, 長さ: 10-15  $\mu\text{m}$ ) を網

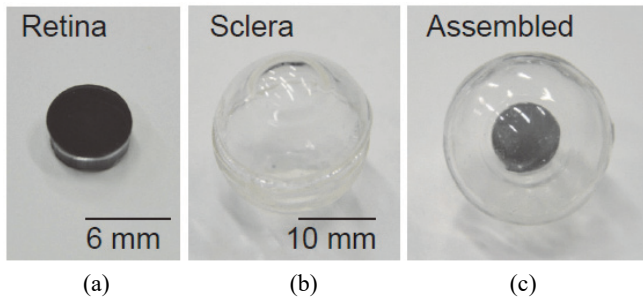


Fig. 2 Fabricated retina model and eye model. (a) Retina model, (b) Eye model, (c) Assembled model.

膜モデルの材料に混合することで光弾性係数を向上させる。  
 モデルの材料として、ポリジメチルシロキサン (PDMS) を用いる。ヒトの強膜は約 1.8-2.9 MPa, 網膜は数十 kPa との報告がある。PDMS は硬化剤濃度でヤング率が調整できるため、硬化剤濃度を変えて強膜・網膜のヤング率を模擬する。

### 3. 実験結果

図 2 にモールドイング法で作製した網膜モデル及び網膜モデルを組み込んだ眼球モデルを示す。網膜モデルは直径 6 mm, 厚みは 500  $\mu\text{m}$  であり, 網膜モデルの下に厚さ 2 mm の強膜が存在する。網膜モデル部の硬化剤濃度は 3 wt%, 強膜部の硬化剤濃度は 10 wt% とした。表 2 に作製した網膜モデル及び眼球モデルのヤング率を示す。引っ張り試験の結果, 網膜モデルのヤング率は 70 kPa, 強膜のヤング率は 1.8 MPa であり, 文献値に同程度のヤング率を達成した。図 3 に網膜モデルの光弾性特性の計測結果を示す。グラフの傾きが光弾性係数である。硬化剤濃度 3 wt% の PDMS の光弾性係数は 67 [ $10^{-12}/\text{Pa}$ ] であるが, 0.1 wt% のカーボンナノチューブを混合することで, 112 [ $10^{-12}/\text{Pa}$ ] に向上した。この光弾性係数は, 光弾性係数材料のポリウレタンゲル 114 [ $10^{-12}/\text{Pa}$ ] と同等の値である。

図 4 に, 作製した網膜モデルを組み込んだ眼球を頭蓋モデルに搭載し, 内境界膜剥離手術用の鉗子を用いて網膜モデルを押しした際の網膜表面の主応力差の分布を計測した結果を示す。作製したモデルを用いて主応力差の計測に成功し, 本研究で提案する網膜モデルの有効性を確認した。

### 4. 結言

本稿では, 内境界膜剥離手術の定量的トレーニングを目的として, ヒトの網膜のヤング率を模擬し, 光弾性による応力計測が可能な生体模倣網膜モデルを作製した。PDMS のヤング率を調整し, カーボンナノチューブを混合することで光弾性係数を向上することで, 頭蓋モデルに組み込んだ網膜モデルへ加わる主応力差の計測に成功した。今後は, 一層の光弾性係数の向上及びリアルタイム応力呈示システムを構築し, 医師による評価を行って有効性を評価する。

### 5. 謝辞

本研究は, 総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により, 科学技術振興機構を通して委託されたものです。

### 参考文献

- [1] G A Lee, et. al., Eye, 20, pp. 32-37, 2006.
- [2] Thomas R. Friberg, Experimental Eye Research, 47, 3, pp. 429-436, 1988.
- [3] B C Basinger, et. al., J. Neural Eng. 6, 055006, 2009.

Table 1 Young's modulus of fabricated model.

Part	Young's modulus (Literature)	Young's modulus (Fabricated)
Scleral	1.8-2.9 MPa	1.8 MPa
Retina	20kPa	70 kPa

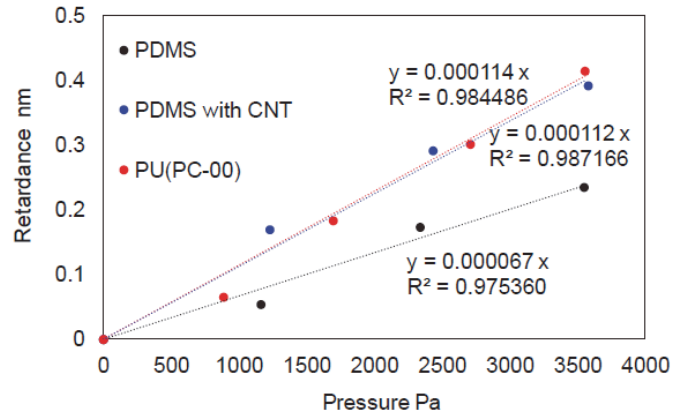


Fig. 3 Photoelastic coefficient of retinal model

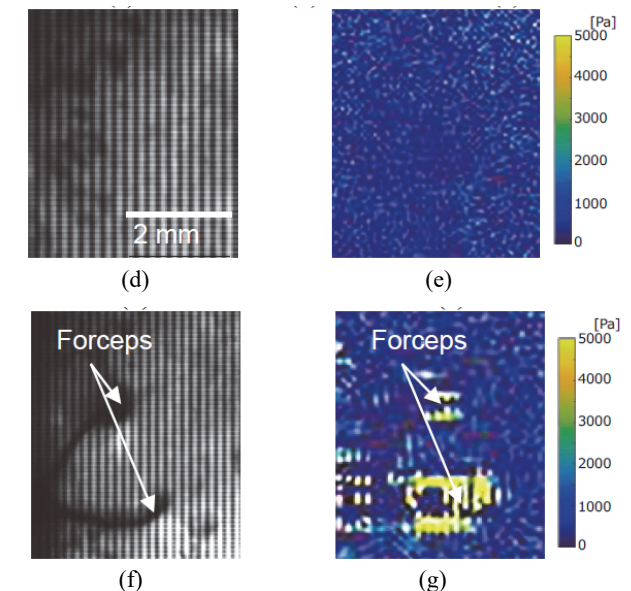
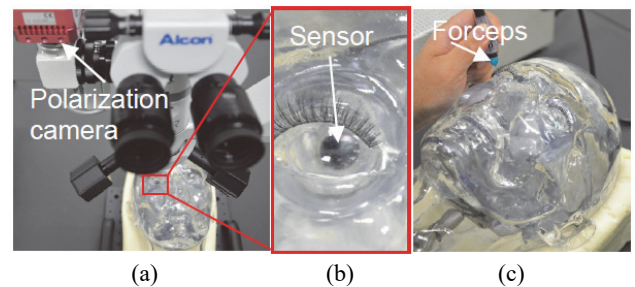


Fig. 4. Measurement of stress distribution on retina model. (a) Experiment model. (b) Eye model, (c) Insertion of forceps, (d) Optical Image of retina (before pushing). (e) Stress image (before pushing), (d) Optical Image of retina (after pushing). (e) Stress image (after pushing),