

バイオニックアイ： 緑内障手術シミュレーションのための眼球モデル

Bionic-EyE: Eye Model for Simulating Glaucoma Operation

○正 小俣 誠二 (名大) 学 大橋 一輝 (名大) Mahmoud Gallab (名大)
 正 原田 香奈子 (東大, 科学技術振興機構) 正 光石 衛 (東大)
 杉本 宏一郎 (東大) 戸塚 清人 (東大) 荒木 章之 (東大)
 高尾 宗之 (東大) 相原 一 (東大) 正 新井 史人 (名大)

Seiji Omata, Nagoya University, s-omata@mech.nagoya-u.ac.jp
 Kazuki Ohashi, Nagoya University
 Mahmoud Gallab, Nagoya University
 Kanako Harada, The University of Tokyo, Japan Science and Technology Agency
 Mamoru Mitsuishi, The University of Tokyo
 Koichiro Sugimoto, The University of Tokyo
 Kiyohito Totsuka, The University of Tokyo
 Fumiyuki Araki, The University of Tokyo
 Muneyuki Takao, The University of Tokyo
 Makoto Aihara, The University of Tokyo
 Fumihito Arai, Nagoya University

A well-mimicked human model is useful to improve surgeon's skill of complicated surgeries and to evaluate new medical devices. The human model with artificial organ modules is expected not only to mimic anatomical characteristics and mechanical properties of a human, but also to be integrated with sensors for quantitative evaluation of skills, we called the human model, "Bionic-Humanoid".

Here, we focused on development of a glaucoma model for trabeculotomy equipped with an artificial sclera and trabecular meshwork (TM) and structure of Schlemm's canal. In this study, we fabricated an artificial TM using blow molding with poly(vinyl chloride) (PVC) film solved with an organic solvent. As the result, we could control thickness of the fabricated artificial TM in appropriate range between 50 to 120 μm as like human TM. After integrating the artificial TM to artificial sclera, we succeeded in a void structure of Schlemm's canal. In the future, we will try to integrate a whole glaucoma model with artificial sclera, TM Schlemm's canal in combination. Moreover, this model should be able to be evaluated by medical doctors for clinical training.

Key Words: Bionic humanoid, Bionic-EyE, Glaucoma simulator

1. 緒言

緑内障は、視神経と視野に特徴的変化を有し、通常、眼圧を十分に下降させることにより視神経障害を改善もしくは抑制しうる眼の機能的構造的異常を特徴とする疾患である。40代で20人に1人は緑内障である可能性が指摘されている[1]。緑内障手術は、国内にて年20万例と白内障手術に次ぐ症例数を誇るが、医師が訓練する為のモデルが十分に開発されていない為、初期教育用シミュレーションシステムが必要とされている。現在開発されている緑内障モデルとして、Bioniko社の製品があるが、中実モデルである為、くり抜く事は可能であるが、眼球構造の生体忠実性が乏しい[2]。この為、本研究では、緑内障手術練習用に中空構造を有する生体忠実性の高い模擬眼球を開発する事を目的とした。



Fig 1. Integrated platform for a specializing eye surgical simulator, named "bionic eye surgery evaluator (Bionic-EyE)".

2. コンセプト

緑内障手術の様な高難易度な手術の練習や、新規デバイスの評価の為に、生体計測に基づいて生体組織の特性を再現し、センサやアクチュエータを統合した精密人体モデルが求められる。益田らは、これを“バイオニックヒューマノイド”と称した[3]。これにより、倫理的な障壁が無くなり、再現性の高い手術トレーニングや、新規デバイスの評価が可能となる。特に眼科手術専用の統合プラットフォームであるバイオニックアイ (Bionic-EyE) を開発した (図1) [4]。本研究では、緑内障モデルを有する眼球モジュールである生体模倣眼球を作製し、手術用トレーニングシステムを構築する。

緑内障手術の一つである線維柱帯切開術 (トラベクロトミー) は、図2に示す様に、強膜を薄く薄切し、シュレム管の

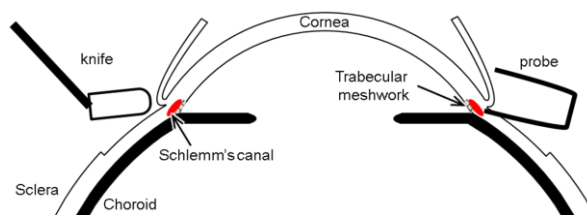


Fig 2. Concept of glaucoma training system using an artificial bionic eye module.

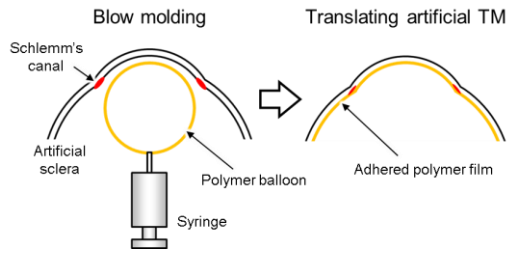


Fig. 3. Fabrication concept and process of an artificial trabecular meshwork (TM) adhered inside artificial sclera.

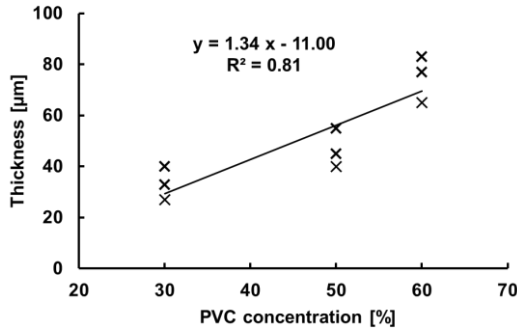


Fig. 4. Relationship of concentration of PVC solution and thickness of fabricated TM.

内面を露出させ、シュレム管内に金属プローブを挿入し、プローブで線維柱帯を切開する。緑内障モデルの主要な構成は、強膜と線維柱帯と管腔構造を有するシュレム管である。Gallabらは、模擬強膜が薄切可能な積層構造化を実現した[5]。一方、模擬線維柱帯に関する研究は行われていない。そこで、本研究では、線維柱帯切開術が可能な緑内障モデルにおける模擬線維柱帯を製作する。

3. 模擬線維柱帯の作製方法

生体線維柱帯は、50–120 μmの厚みを有し[6]、AFMでの押込み計測による弾性率は約100 kPaと言われている[7]。この為、製法方法としては、ディップコート法よりも薄膜生成が容易で再現性が高い成膜が可能なブロー成型法を用いて(図3)、塩化ビニル(PVC)薄膜を模擬眼球の内側に密着させた。溶媒にはテトラヒドロフラン(THF)とN,N-ジメチルホルムアミド(DMF)を等量混合にて用いた。

4. 結果と考察

4.1 模擬線維柱帯の作製結果

図4に示す様に、溶解PVC濃度に対する模擬線維柱帯の膜厚計測を行った。溶液中のPVC濃度を30–60%に変化させる事により、成形後の膜厚を30–60 μmに調整する事に成功した。ヒト線維柱帯の膜厚は、50–120 μmである為[6]、本実験で作成した模擬線維柱帯は適正な値である事が示された。

4.2 模擬シュレム管構造の作製

図5に示す様に、模擬線維柱帯に対し、ブロー成型法を用いて模擬強膜の内側に密着させる事に成功した。また、図6に示す様に、赤インクを注入した所、シュレム管構造の全域

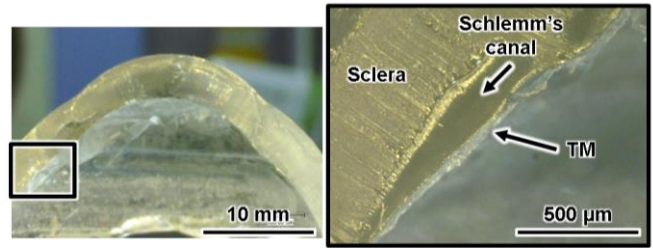


Fig. 5. Sectional photos of the fabricated artificial TM.

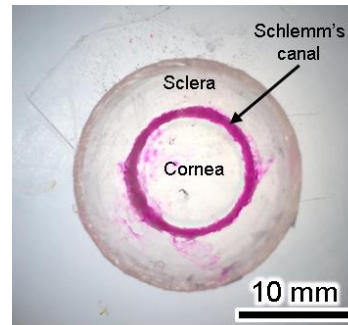


Fig. 6. Snapshot of water filling test into the fabricated artificial Schlemm's canal by needle injection with a red inc.

に流れ込み、管腔構造である事が確認された。

5. 結言

本研究では、バイオニックアイにおける緑内障手術用眼球モジュールを提案し、緑内障手術の基本手技である線維柱帯切開術の訓練を行う為の中空な生体模倣眼球を作製した。ブロー成型法により、模擬線維柱帯を模擬強膜に密着させ、管腔構造を有する模擬シュレム管構造を維持する事に成功した。成形膜厚はヒト生体線維柱帯と同様となり、形態の模倣に成功した。今後は、模擬線維柱帯の機械的特性(弾性率や破断特性)の評価を行う予定である。さらには、本緑内障モデルをモジュール構造化する事により、眼科手術用プラットフォームであるバイオニックアイに組み込む事により、医師による官能評価試験を行う。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)の一環として実施したものです。

参考文献

- [1] A. Iwase et al., "The prevalence of primary open-angle glaucoma in Japanese: The Tajimi Study" *Ophthalmology*, 111(9):1641-1648, 2004.
- [2] A. Bernal, "Ophthalmic surgical simulation system", US20160063898A1, 2016.
- [3] 益田泰輔ら, "バイオニックヒューマノイド:次世代手術訓練用人体モデルのデザイン", In ROBOMECH2017, on USB, 2017.
- [4] S. Omata et al., "A Novel Eye Surgery Simulator for Exercising Operation Task of Inner Limiting Membrane Peeling", In MHS2017, on CD-ROM, 2017.
- [5] M. Gallab et al., "A novel Eye-Surgery Simulator of Glaucoma Surgery with a Bionic Eye Model", In MHS2017, on CD-ROM, 2017.
- [6] T.S. Dietlein et al., "Morphological variability of the trabecular meshwork in glaucoma patients: implications for non-perforating glaucoma surgery", *BMJ*, 84(12):1354-1350, 2000.
- [7] T.R. Friberg et al., "A comparison of the elastic properties of human choroid and sclera", *Experimental Eye Research*, 47(3): 429-436, 1988.