

眼科手技を模擬した眼科手術シミュレータの開発 ～マイクロフックを用いた緑内障手術用眼球モデルの開発に成功～

名古屋大学大学院工学研究科の 新井 史人 教授、小俣 誠二 特任助教の研究グループは、東京大学大学院医学系研究科の 相原 一 教授の研究グループと東京大学大学院工学系研究科の 光石 衛 教授の研究グループとの共同研究により、科学技術振興機構 (JST) の原田 香奈子 (はらだ かなこ) ImPACT プログラム・マネージャーのプログラムの研究成果として、人間そっくりな眼科手術シミュレータに搭載可能な緑内障手術用眼球モデルを、この度、開発しました。

近年、医学教育の効率化や難手術の効果的訓練が求められており、我々は、以前より精巧な手術シミュレータを開発してきました。一方、より侵襲性の低い緑内障手術用の治療器具が開発されているにもかかわらず、練習用の模擬眼球が十分に開発されておらず、医師が基礎学習や術前訓練を十分に行うことができませんでした。

本研究では、上記の課題を踏まえ、緑内障手術に必要な前眼部構造を形成することにより、近年の低侵襲緑内障手術に対応した眼科手術シミュレータを開発することに成功しました。これにより、従来では行うことのできなかった手技訓練を行うことが可能になりました。

この研究成果は、以下にて学術発表、展示公開いたします。

日時	名称	場所
9月14-16日	第29回日本緑内障学会	朱鷺メッセ (新潟県)
11月9-11日	第27回日本コンピュータ外科学会大会	第27回日本コンピュータ外科学会大会 (奈良県)
12月9-12日	第29回MHS2018	名古屋大学 (愛知県)

この研究は、平成27年度から始まった内閣府 ImPACT プロジェクト「バイオニックヒューマノイドが拓く新産業革命」の支援の下で行われたものです。

【ポイント】

- 動物実験では必要とされる倫理審査が不要で、どこでも設置可能な人間そっくりな眼科手術シミュレータを開発
- 世界に先駆けて、マイクロフック^(注1)を用いた低侵襲緑内障手術に対応した眼球モデルの構築・搭載に成功し、一連の手術動作の訓練が可能に
- 若手医師の早期習熟に貢献することを期待

【研究背景と内容】

医師が手術手技を早期に体得するためには、人体構造を忠実に再現した手術シミュレータが、教育上、重要です。これを用いることにより、身をもって医療行為を理解することが可能になり、さらには術中のチームワークの評価・向上に役立つと言われています。特に、難治療であり、若手医師が経験する機会が乏しい手技に対しては、精巧な手術シミュレータの開発は、手技修得を促進し、医療行為の安全性を高めるものと期待され、多くの治療行為に対するシミュレータが活発に開発されています。そして、医学教育の効率化のため、よりリアルな手術シミュレータの開発が望まれています。

我々は、様々な手術が模擬できる共通プラットフォームとして、生体計測に基づいて生体組織の特性を再現し、力や位置などを計測する機能や臓器の動きを再現する機能を兼ね備えた精密人体モデルを構築しています。我々は、これを“バイオニックヒューマノイド”と称しています。このバイオニックヒューマノイドとして、眼科手術のシミュレーションに特化した眼科手術シミュレータと眼球モデルを開発してきました。そして、現在までに、数種の眼科手術シミュレータが市販されている中において、次のような課題を解決することを目指しました。

- 近年注目を集めている低侵襲な緑内障の手術手技^(注2)を訓練するための眼球モデルが、十分に開発されていない。
- 緑内障手術用眼球モデルに必要なヒト眼と同等な中空薄肉構造を持つ眼球モデルが、存在しておらず、十分な訓練が行えない。
- 緑内障手術用眼球モデルに必要な眼球内の隅角観察を行うことが可能な眼球モデルが、市販されていない。
- 緑内障手術用眼球モデルに必要な、精巧な隅角構造を有する眼球モデルが、十分に開発されていない。

緑内障を発症すると、隅角^(注3)にある線維柱帯^(注4)の透水性が低下し、排水不良が発生し、眼内の圧力が増加します。眼内圧が増加すると眼底の根元にある視神経乳頭^(注5)において視神経や血管を圧迫して、最悪の場合は、失明する可能性があります。これを治療するための緑内障手術には、大きく二つの外科的手法があることが知られています。一つは古典的な手法である線維柱帯切開術^(注6)および線維柱帯切除術^(注7)です。これらは、基本的な手技として、臨床で多く採用されています。最近、線維柱帯切開術については、概念として低侵襲緑内障手術(Minimal Invasion Glaucoma Surgery: MIGS)と呼ばれる手法です。術後の合併症の影響を少なくするために、近年、低侵襲緑内障手術が可能となる新規器具が多く開発されています。

MIGS において重要な構造は、角膜輪部^(注8)周辺の組織構造と隅角構造です。特に重要な要素は、図1に示しますように、眼内の循環している房水^(注9)の排出流路であるシュレム氏管^(注10)とフィルタ機能を呈する線維柱帯です。シュレム氏管は幅が500マイクロメートル程度の細い管であり、線維柱帯と呼ばれるス

ポンジ状の膜状組織により眼内と隔離されています。緑内障を発症した患者の線維柱帯の厚みは圧迫され潰れており、およそ50–120マイクロメートルと言われています。MIGS の一部の方法においては、針状のマイクロフックを用います。図 2 に示しますように、術者は角膜輪部を貫通するようにマイクロフックを挿入して、逆側の隅角に先端を突き刺し、線維柱帯のみを掻き取ります。このように、線維柱帯の切開を行い、眼内の房水の流れを正常化させます。

この術式は、一見簡単そうに見えますが、マイクロフックは、シュレム氏管のごく近傍の角膜の内側や虹彩^(注 11)に接触することができません。これは、接触により、角膜内皮細胞の減少による角膜の白濁や、虹彩接触による疼痛などが起こるからです。このため、術者は、幅500マイクロメートルしかないシュレム氏管のみにアプローチをかける必要があります。このようにシュレム氏管を隅角レンズで観察しながら、マイクロフックを接近させるためには、多くの練習が必要となります。

上記の課題を解決するためには、緑内障手術用眼球モデルは、以下の項目が満たされる必要があります。

- 精密な隅角構造を持ち、シュレム氏管の管腔構造を搭載した線維柱帯としての薄膜構造が積層されている。
- 隅角レンズ^(注 12)を用いた観察が可能な、透明な角膜を持っている。

これらの要求を解決する手術シミュレータは今まで開発されておらず、医師が事前に低侵襲緑内障手術を練習する機会が乏しい状況にありました。このため、本研究では、上記の要求を満たすべく、緑内障手術シミュレータの開発を行いました。

我々は、以前より眼科手術シミュレータであるバイオニックアイ(Bionic eye surgery evaluator: Bionic-EyE)を開発してきました。本研究では、バイオニックアイに搭載可能であり、近年注目されているマイクロフックを用いた MIGS の訓練が可能な緑内障手術用眼球モデルの開発に成功しました。

この緑内障手術用眼球モデルの作製に関しては、精密加工により作製した造形型を用いてシュレム氏管構造と透明角膜を持つ眼球モデルを作製し、さらには幅500マイクロメートル程度のシュレム氏管構造を作製しました。模擬線維柱帯の作製にあたっては、この眼球モデルの内側に薄膜を成型する必要があるため、高分子材料^(注 13)(弾力ゴム)を用いてブロー成型^(注 14)により積層しました。この方法は、中空の球体の中で風船を膨らませ、風船を球体内側に密着させる事により実現しました。本研究では、エラストマー材料に塩化ビニルを用い、有機溶媒に高濃度で溶かした状態で、風船上に膨らませることで成型を行いました。この結果、シュレム氏管の中空構造を保ったまま、模擬線維柱帯を積層することに成功し、図 3 に示すように、模擬血液として赤インク水溶液を注入することが可能になりました。そして、この緑内障手術用眼球モデルをバイオニックアイに搭載し、眼科手術シミュレータとしての統合を果たしました。

さらに、上記の緑内障モデルに対して、マイクロフックを用いた MIGS の模擬を行いました。ここでは、マイクロフックとしてカフックデュアルブレード^(注 15)を用いました。図4に示すように、マイクロフックで線維柱帯を切開する手術手技のシミュレーションに、世界に先駆けて成功しました。また、開発した緑内障手術用眼球モデルは、形態学^(注 16)に基づいた眼球形状を採用しているため、市販の隅角レンズや開瞼器^(注 17)、マイクロフックなどの臨床で実際に使用される器具を利用することが可能です。これにより、眼科手術シミュレータを用いて、開発中、あるいは新規に開発された医療器具の評価が行えると考えています。

今後は、古典的な方法である強膜薄切^(注 18)による線維柱帯切開術や切除術のシミュレーションが可能な眼球モデルとするため、模擬強膜の開発を行う予定です。また、アウトリーチ活動として、第 29 回緑内障

学会や国際学会の 29th 2018 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2018)にて学術発表を行い、第 27 回コンピュータ外科学会及び MHS2018 等で展示を予定中です。

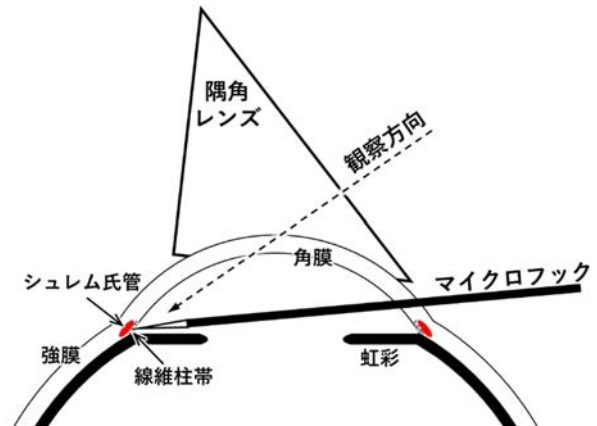
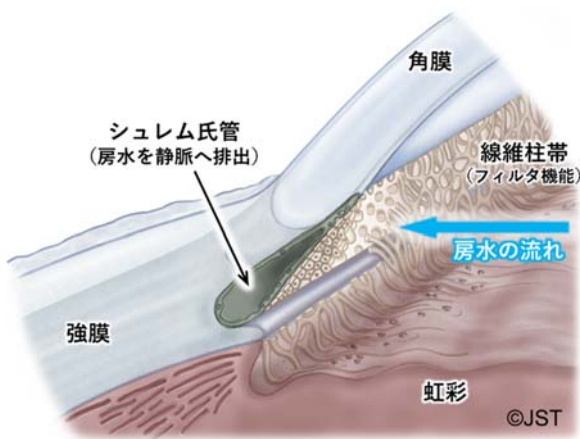
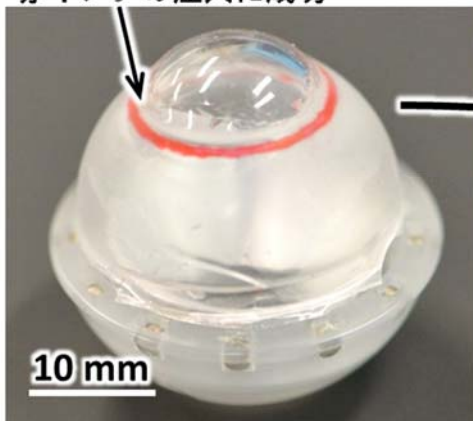


図1 ヒト眼球における角膜輪部と隅角構造の詳細 (左)

図2 低侵襲緑内障手術の一例 (マイクロフックを用いた場合)

シュレム氏管様構造へ赤インクの注入に成功



バイオニックアイへの搭載

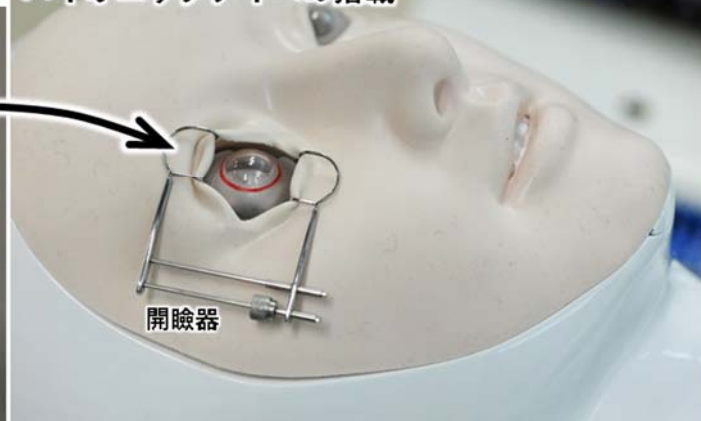


図3 シュレム氏管構造と模擬線維柱帯を有する模擬眼球とバイオニックアイへの統合

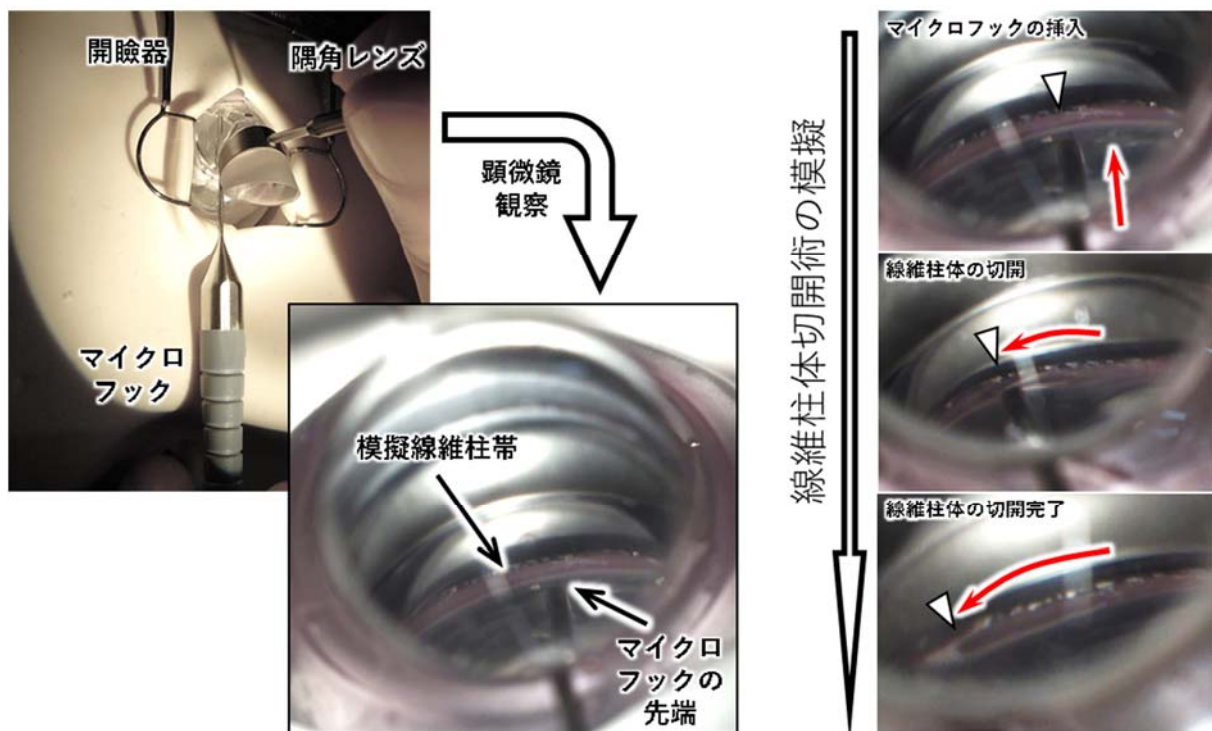


図4 マイクロフックを用いた線維柱帯切開術の訓練の様子

【成果の意義】

- 世界に先駆けて、低侵襲緑内障手術の一つであるマイクロフックを用いた線維柱帯切開術の手術の訓練が可能な眼科モデルの開発に成功した。
- 柔らかい眼球モデル内に隅角構造を構築したため、十分な練習が必要とされる隅角レンズを用いた術中の観察の練習が行える。
- 眼科顕微鏡を有する眼科医局やウェットラボ^(注19)を有する企業等にて、即座に、低侵襲緑内障手術の練習を行うことが可能になる。
- 開瞼器や隅角レンズなどを、実際の手術と同様に用いることができるため、一連の手術動作の練習が可能になった。

【用語説明】

- (注1) マイクロフック: 緑内障手術の線維柱帯切開術様に開発された微細な鉤針。谷戸氏 abinterno やカフックデュアルブレードなど多く開発されている。
- (注2) 低侵襲緑内障手術(MIGS): 線維柱帯切開術の一種で、角膜輪部から器具を挿入して中からアプローチする方法。
- (注3) 隅角: 線維柱帯・シュレム氏管を含めた房水の流出路の場所で、角膜と虹彩の間の空間。
- (注4) 線維柱帯: 隅角部において眼内とシュレム氏管との境界となるスポンジ状の膜状組織。加齢等に伴いスポンジが潰れていき眼圧が増加する。
- (注5) 眼底視神経乳頭: 眼底網膜の視神経が集まった部分のこと。脳につながる視神経が眼球と繋がっている。
- (注6) 線維柱帯切開術: 目の中の排水管の線維柱帯を切って排水を回復する手術。白い強膜を薄切して線維柱帯を切開する外からのアプローチと、角膜輪部から器具を挿入して中からアプローチ

する方法がある。

- (注7) 線維柱帯切除術: 強膜とブドウ膜の一部を切除して、眼内と結膜下の上にバイパスとなる流路を作製して、房水を結膜下に排出する手術。
- (注8) 角膜輪部: 透明な角膜と白い強膜との遷移領域の総称。
- (注9) 房水: 眼内を循環する体液。眼圧の調整媒体。
- (注10) シュレム氏管: 房水の排出経路の一種。500マイクロメートル程度の環状の中空構造を有します。
- (注11) 虹彩: 眼球の前面、ひとみの周りにある円盤状の膜。伸縮してひとみの大きさを変え、網膜に達する光の量を加減する。
- (注12) 隅角レンズ: 隅角部を拡大して観察し、診察や手術を行うためのレンズ
- (注13) 高分子材料: 有機高分子鎖を主成分とする材料の総称。プラスチックやゴムなどのこと。
- (注14) ブロー成型: 吹きガラスと同様に、プラスチックの加工法の一種。ペットボトルやポリタンクなど、中空の製品を作るのに用いられる。
- (注15) カフークデュアルブレード: 米国コロラド大学のカフーク教授が開発した線維柱帯を正確に帯状に切除できるようにした手術器具。
- (注16) 形態学: 生物の構造と形に関する学問。
- (注17) 開瞼器: 瞼(まぶた)を大きく開いて、手術の補助をする器具。
- (注18) 強膜薄切: 強膜の一部を薄切し、シュレム氏管を露出させたり、線維柱体周辺組織を取り除いたりするための作業の一種。
- (注19) ウェットラボ: 医師が外科訓練を行うための施設や集会のこと。湿潤状態で行うことをウェットラボと称し、乾燥状態で行なうことをドライラボと称する。