

ワイヤレス電力伝送と光電変換薄膜デバイスによる完全埋込型の人工網膜

Completely Implantable Artificial Retina with Wireless Power Transmission and Photoelectric Conversion Thin-Film Devices



木村 睦 (Mutsumi Kimura, Ph. D.)
 龍谷大学 先端理工学部 電子情報通信課程 教授
 (Professor, Ryukoku University, Faculty of Advanced Science and Technology, Electronics, Information and Communication Engineering Course)
 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 客員教授
 (Affiliate Professor, Nara Institute of Science and Technology (NAIST), Graduate School of Science and Technology, Division of Information Science)
 IEEE SID 電子情報通信学会 応用物理学会
 受賞: SID Fellow (2023年) Japanese Journal of Applied Physics: 2020 Reviewer Awards (2021年) 他
 著書: スッキリ!がってん! 有機ELの本, 電気書院 (2017年) 搭載!! 人工知能, 電気書院 (2016年) 他
 研究専門分野: 薄膜デバイス センサー ニューロモーフックシステム

あらまし

ワイヤレス電力伝送と光電変換薄膜デバイスによる完全埋込型の人工網膜の研究を行った。ワイヤレス電力伝送と光電変換薄膜デバイスにより、体内外間ケーブルが不要となり、眼球上光電変換により、画像取込方向と眼球方向を一致させることができ、将来的に可曲人工網膜により、眼球曲面へ埋植できるようになる。本研究では、ワイヤレス電力伝送としては、磁気結合方式による高い伝送効率・安定した電圧供給・十分な刺激電流・送信器と受信器の位置ズレや遠距離化に対するフリーアクセス性やロバスト性を達成した。光電変換薄膜デバイスとしては、照射光照度と光誘起電流の線形性・色感度が赤<緑<青であること・適切な網膜画素の回路構成の接続方法・光感度として数 lux まで感度を持つこと・デバイス構造として n 型・p 型・pin 型トランジスタのいずれも同様な感度を持つことを確認した。眼球ファントムとしては、豚眼の代替として、正常な実験結果が得られることを確認し、人工網膜が

ら、適切な刺激信号を得ることに成功した。

1. 研究の背景・目的

地球規模での高齢化問題が社会的課題として問いただされているなかで、健康寿命の長寿化に関心が集まっている。特に、人が得る情報の 80~90%を占める視覚は、毎日の生活の質を維持するための、最大の感覚機能のひとつである。失明原因のうち大きな割合を占めるものに、網膜色素変性症や加齢黄斑変性症などがあるが、前者の一部を除き、iPS 細胞などの再生医療は適用困難で、人工網膜が相補的な治療方法として挙げられている。しかしながら、現在の人工網膜は、体外カメラの画像信号を体内電極に送信する形式で、体内外間ケーブルが必要であったり、画像取込方向と眼球方向の不一致があったり、人工網膜そのものが非可曲で眼球曲面への埋植が困難であったり、という問題があった。

目的 ^①	技術 ^②
体内外間ケーブルの不要化 ^③	ワイヤレス電力伝送による電源ケーブルの不要化 ^④ 光電変換薄膜デバイスによる画像信号ケーブルの不要化 ^⑤
画像取込方向と眼球方向の一致 ^⑥	光電変換薄膜デバイスによる眼球上光電変換 ^⑦
眼球曲面への埋植 ^⑧	光電変換薄膜デバイスによる可曲人工網膜 ^⑨

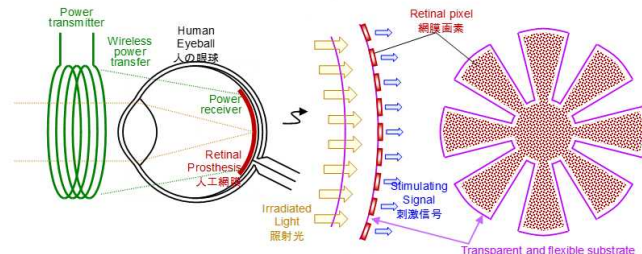


図1 ワイヤレス電力伝送と光電変換薄膜デバイスによる完全埋込型の人工網膜

そこで本研究では、下記の目的と、その実現にむけての各々の技術の開発を行う(図1)。すなわち、ワイヤレス電力伝送として、眼鏡に電力送信器を、人工網膜に電力受信機を備え付ければ、電源ケーブルが不要となり、光電変換薄膜デバイスとして、人工網膜での光電変換を行えば、画像信号ケーブルが不要となる。また、同じく人工網膜での光電変換を行うことで、画像取込方向と眼球方向が一致し、視覚情報の不自然さを改善できる。このためには、光電変換薄膜デバイスが透明基材に作製可能で、眼球の水晶体方向からの光

ワイヤレス電力伝送と光電変換薄膜デバイスによる完全埋込型の人工網膜

Completely Implantable Artificial Retina with Wireless Power Transmission and Photoelectric Conversion Thin-Film Devices

を受光し、網膜方向への刺激信号を出力することができる特長も有効である。さらに、光電変換薄膜デバイスは、プラスチックやポリマーフィルムといったフレキシブル基材にも将来的には作製可能で、可曲人工網膜による眼球曲面への埋植ができることも、取込画像の高視野角化や高精細化に意味がある。

そして本研究では、ワイヤレス電力伝送と光電変換薄膜デバイスによる完全埋込型の人工網膜を、実際に試作しての研究開発を行う。ワイヤレス電力伝送については、理論設計と実験評価から、伝送効率を向上させ、眼球などに悪影響なく十分な電力供給を実現する。光電変換薄膜デバイスの設計試作から、光感度や色感度の実験評価を行う。さらに、人工網膜の実証実験としては、毎回の実施が問題となる豚眼実験などにかわり、眼球ファントムの研究開発で、数多くの実証実験を可能なものとする。なお本研究は、通信工学によるワイヤレス電力伝送、電子工学による光電変換薄膜デバイス、バイオサイエンスによる生体刺激や眼球ファントムといった、複数の研究領域にまたがった総合的な研究内容である。

2. 研究の方法

[ワイヤレス電力伝送]

最近に理論面と実際面で研究開発がすすんでいる磁気結合型で、眼鏡と人工網膜の相対位置の変化に対応するフリーアクセスのワイヤレス電力伝送を実現する。整流回路や定電圧回路および人工網膜の負荷も考慮しながらの、効率向上を図る(図2)。人工網膜に特性最適化を施した磁気結合型のワイヤレス電力伝送を適用するのは、独自の試みである。

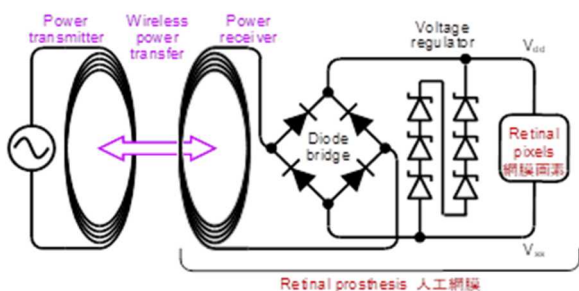


図2 ワイヤレス電力伝送システム

[光電変換薄膜デバイス]

研究代表者は、長年にわたる薄膜デバイスの研究開発の経験を持ち[1]、光電変換デバイスについても多くの知見をもっている[2]。人工網膜に光電変換薄膜デバイスを適用するのは、独自の試みである。

[眼球ファントム]

ポリビニルアルコール (PVA) の注入成形により、眼球の形状のみならず、強膜の膜厚や硬度や電気伝導率までも再現した眼球ファントムを作製できる(図3)。動物実験なしにここまで精度のよい実証実験を行うのは、独自の試みである。歯科技工士によりリアルなファントムを作製することも特徴である。

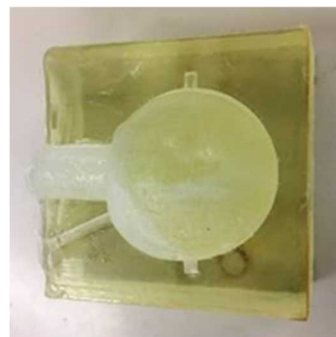


図3 眼球ファントム

3.

研究の結果・成果

[ワイヤレス電力伝送]

まず、磁気結合方式により、伝送効率 24.5%で安定した電圧供給 5V と十分な刺激電流 $3\mu A$ を得ることに成功した(図4) [3]。つぎに、磁気結合方式による伝送効率・電圧・電流供給を、眼球ファントム実験でも実現することに成功した。これは、本方式の送信器と受信器の位置ズレや遠距離化に対するフリーアクセス性やロバスト性を証明するものである[4]。さらに、その電力供給で本研究の人工網膜の動作が可能であることを確認した。ただし、現時点では、 $10 \times 10 = 100$ 画素であり、将来的にさらに高精細化がすすむと、さらに高伝送効率が必要となることが示唆された。

ワイヤレス電力伝送と光電変換薄膜デバイスによる完全埋込型の人工網膜

Completely Implantable Artificial Retina with Wireless Power Transmission and Photoelectric Conversion Thin-Film Devices

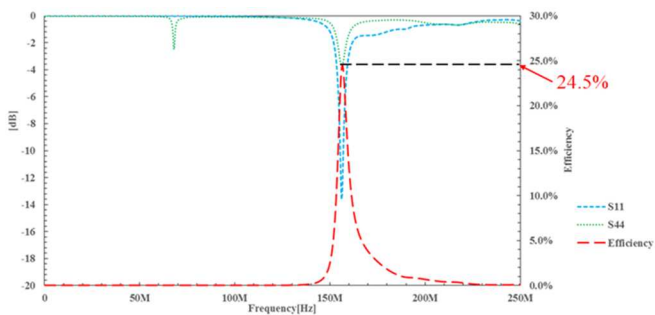
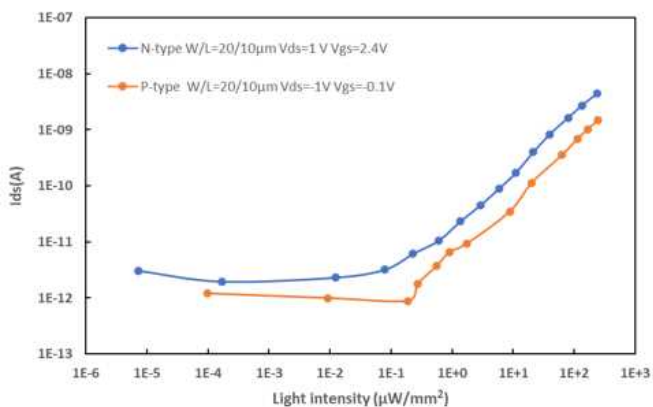


図 4 磁気結合方式の伝送効率

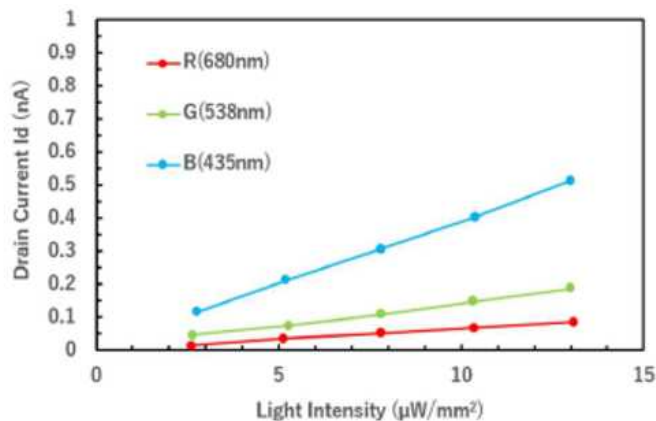
[光電変換薄膜デバイス]

まず、光感度については、照射光照度に対する光誘起電流の依存性を評価し、照射光照度と光誘起電流の線形性を確認した。微弱照射光に対する光誘起電流の応答についても評価している。色感度については、赤く緑く青であることを確認した。人間の視覚と一致させるには、色感度を補正するための例えばカラーフィルタなどの工夫が必要となると思われる(図 5) [5][6]。

つぎに、光電変換薄膜デバイスの網膜画素の回路構成のうち、P型リセットトランジスタを電源電圧に接続する形式と、N型リセットトランジスタを接地電圧に接続する形式が、人の網膜への適切な周波数の刺激信号を生成できることがわかった。これは、回路シミュレーションの結果とも一致している(図 6) [7][8]。さらに、光感度については、数 lux まで感度を持つことを確認した。これは、ロウソクの照度に対応するため、まずは十分な感度であるといえる(図 7) [9][10]。デバイス構造として、n型・p型・pin型トランジスタのいずれも、同様な感度を持つことを確認した。それぞれのデバイス構造に対して、駆動条件として、ゲート・ドレイン電圧の最適値があることを確認した[5][6]。また、光誘起電流の温度特性のアルヘニウスプロットから、活性化エネルギーは0.5eV程度であることを確認した。これは、光誘起電流が電子とホール対生成によるものである証拠であり、想定どおりである(図 8) [11]。

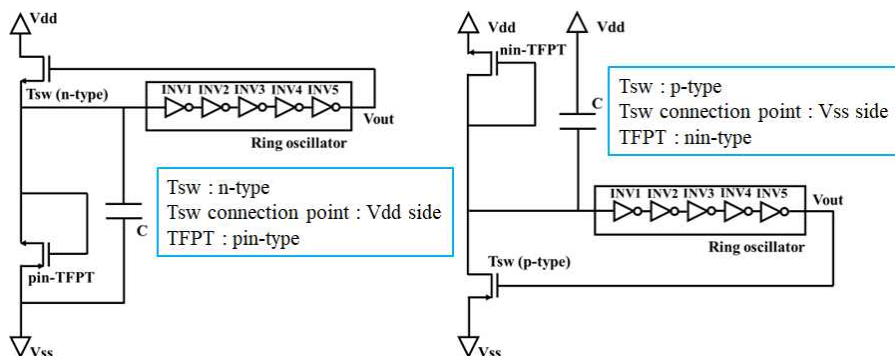


(a) n型トランジスタとp型トランジスタの光感度



(b) pin型トランジスタの色感度

図 5 光電変換薄膜デバイスの光感度と色感度



(a) P型リセットトランジスタを電源電圧に接続

(b) N型リセットトランジスタを接地電圧に接続

図 6 網膜画素の回路構成

ワイヤレス電力伝送と光電変換薄膜デバイスによる完全埋込型の人工網膜

Completely Implantable Artificial Retina with Wireless Power Transmission and Photoelectric Conversion Thin-Film Devices

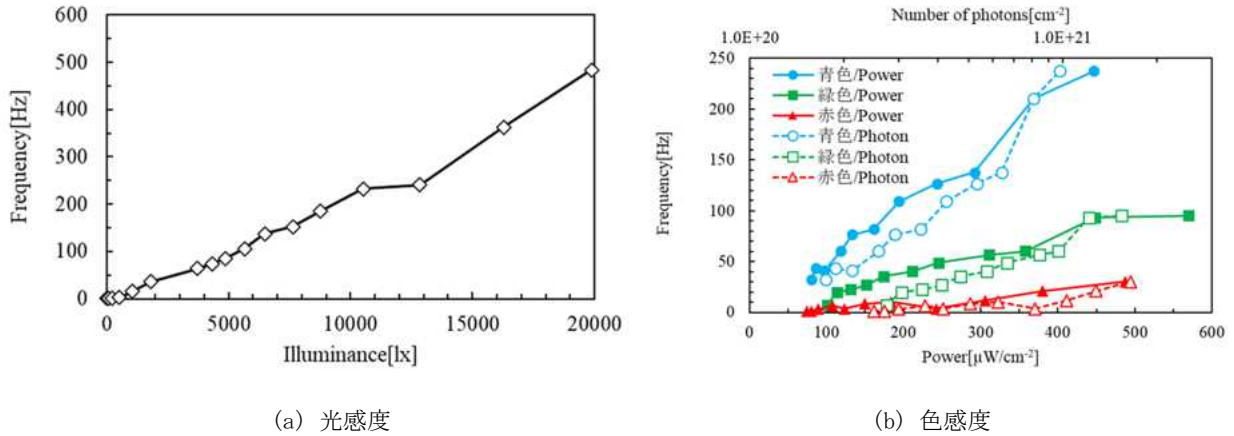


図7 人工網膜の光感度と色感度

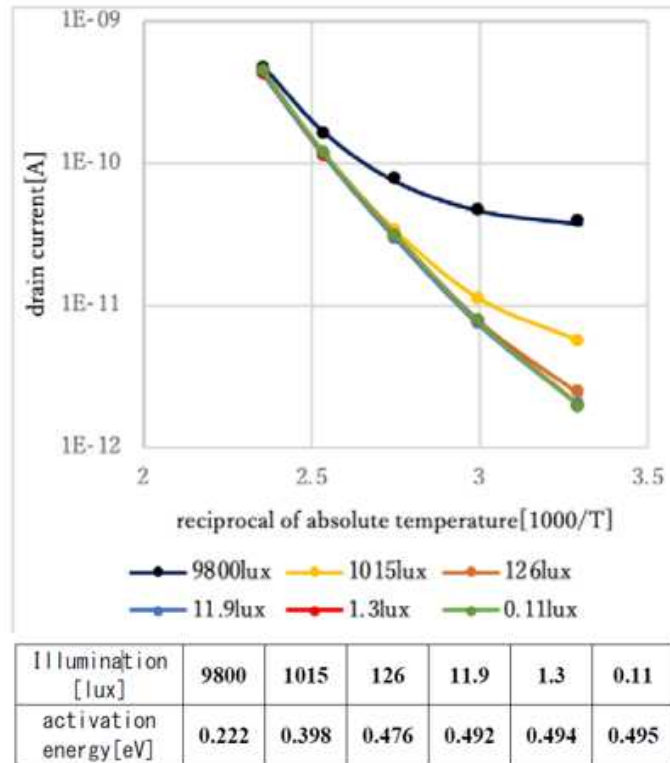


図8 光誘起電流のアルヘニウスプロット・活性化エネルギー

ワイヤレス電力伝送と光電変換薄膜デバイスによる完全埋込型の人工網膜

Completely Implantable Artificial Retina with Wireless Power Transmission and Photoelectric Conversion Thin-Film Devices

[眼球ファントム]

まず、眼球ファントムの利用しながらでも、正常な実験結果が得られることを、刺激電流疑似波形と In vitro 疑似 In vivo 実験で確認した (図 9) [4]。つぎに、光電変換薄膜デバイスによる人工網膜から、適切な刺激信号を得ることに成功した (図 10) [12]。

これらの結果から、人工網膜の基本的な要件は揃っ

たとえられるため、人工網膜の実証試験を行うために、さらなる研究者のネットワークを広げるべく、積極的な学会発表などを行った。具体的には、当研究テーマにて、国際会議の招待講演を 1 件、学会発表を 7 件、国内研究会の招待講演を 1 件、学会発表を 2 件、行っている。今後の反応を楽しみにしているところである。

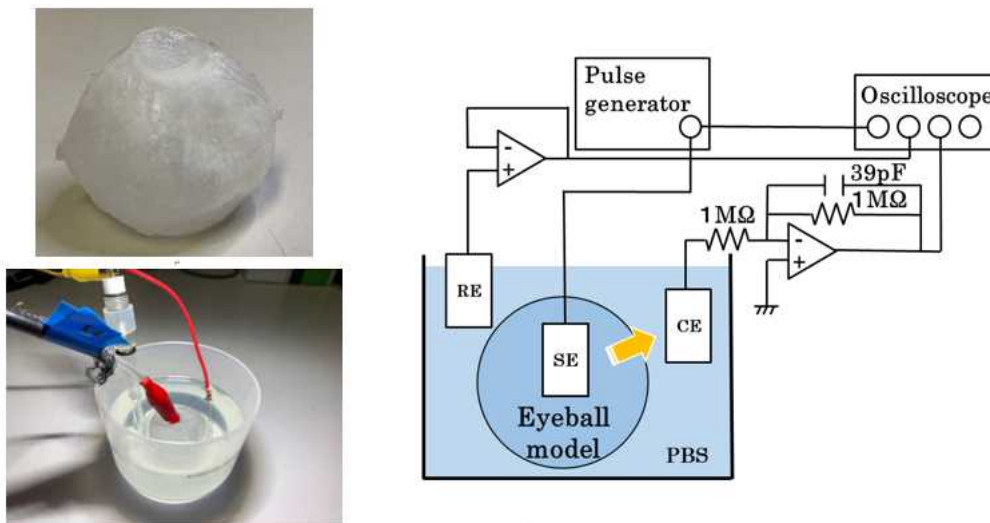


図 9 眼球ファントムと刺激電流疑似波形による In vitro 疑似 In vivo 実験

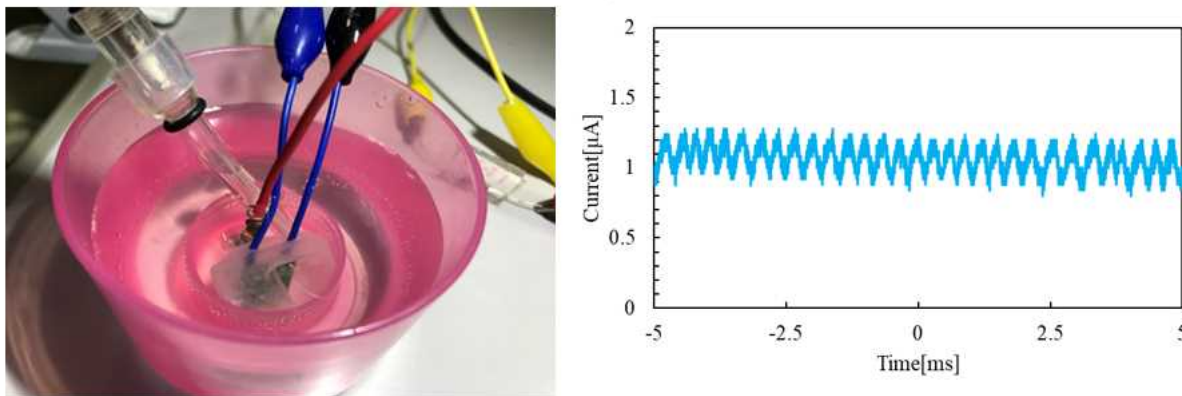


図 10 眼球ファントムによる人工網膜の刺激電流

ワイヤレス電力伝送と光電変換薄膜デバイスによる完全埋込型の人工網膜

Completely Implantable Artificial Retina with Wireless Power Transmission and Photoelectric Conversion Thin-Film Devices

4. 研究の将来展望

網膜色素変性症と加齢黄斑変性症は、合計で失明原因の20%以上を占めている(図11)。本研究による人工網膜が実現されれば、健康寿命の長寿化に資することとなる。また、体内外間ケーブルが不要で、画像取込方向と眼球方向も一致して視覚情報の不自然さもなく、クオリティオブライフ(QOL)も高いレベルで維持できる可能性がある(図12)。異なる面からは、人工網膜に限らず、ワイヤレス電力伝送で効率的な体内へのエネルギー供給が可能となると、人工内耳や人工心臓やそのほかさまざまな人工臓器を、体内外間ケーブルなしにかつ埋込電池交換なしに連続動作させることが可能となり、やはりQOLを高いレベルで維持できる可能性がある。

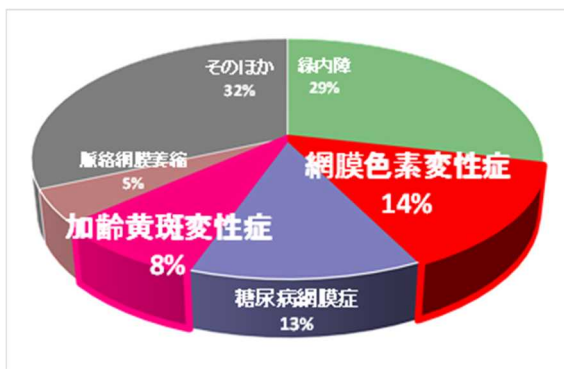


図11 失明原因

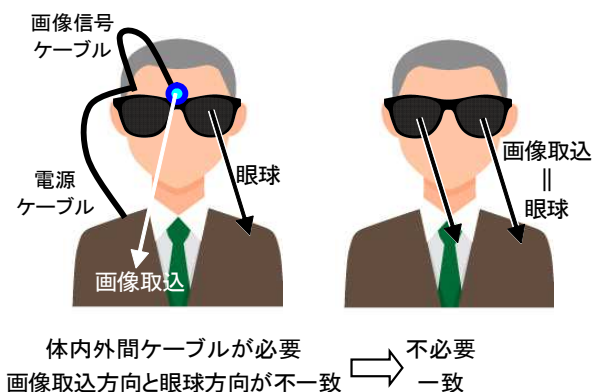


図12 QOLの向上

おわりに

ワイヤレス電力伝送と光電変換薄膜デバイスによる完全埋込型の人工網膜の研究を行った。網膜色素変性症と加齢黄斑変性症は、合計で失明原因の20%以上を占めていて、本研究による人工網膜が実現されれば、健康寿命の長寿化に資することとなり、体内外間ケーブルが不要で、画像取込方向と眼球方向も一致して視覚情報の不自然さもなく、QOLも高いレベルで維持できる可能性がある。本研究から基本的な要件は揃ったと考えられるため、実証試験を行うためにさらなる研究者のネットワークを広げるべく、積極的な学会発表などを行った。

参考文献

- [1] [招待講演] Mutsumi Kimura and Yasuhiko Nakashima, Feasibility Studies of Novel Applications using AOS Devices for Flexible Electronics, MRM 2021, D6-O6-05, Dec. 2021
- [2] Mutsumi Kimura, Shuhei Kitajima, Kun Li, and Daping Chu, Magnifying Viewer using Poly-Si Thin-Film Phototransistor and Liquid-Crystal Micro-Lens Array, SID '20, pp. 540-543, Aug. 2020
- [3] Kohei Toyoda, Keisuke Tomioka, Keigo Misawa, Naoya Naitou, Toshihiko Noda, Jun Ohta, and Mutsumi Kimura, Comparison of Pixel Circuits in Pig Eyeball Experiment of Artificial Retina using Thin-Film Devices, AM-FPD '20, 6-2, pp. 137-140, Sep. 2020
- [4] Naoya Naito, Kouhei Toyoda, Yoshio Okano, and Mutsumi Kimura, Biological Environment Imitation Experiment of Artificial Retina using Thin Film Device, IMFEDK 2020, Nov. 2020
- [5] Masataka Mori, Kohei Toyoda, Ryota Ichikawa, Yuise Sadamura, and Mutsumi Kimura, Investigation of the Light Sensitivity of LTPS TFTs for Optical Sensors, IMFEDK 2021, Nov. 2021
- [6] Ryota Ichikawa, Kohei Toyoda, Masataka Mori, Yuise Sadamura, and Mutsumi Kimura

ワイヤレス電力伝送と光電変換薄膜デバイスによる完全埋込型の人工網膜

Completely Implantable Artificial Retina with Wireless Power Transmission and Photoelectric Conversion Thin-Film Devices

- Evaluation of pin-type LTPS-TFPT for Optical Sensor Applications, IMFEDK 2021, Nov. 2021
- [7] 豊田 航平, 市川 涼太, 森 真崇, 木村 睦, LTPS-TFT 人工網膜の光照射に対する周波数依存性の画素回路比較, 薄膜材料デバイス研究会 第 18 回研究集会, pp. 85-88, 2021 年 11 月
- [8] [招待講演] Kohei Toyoda, Naoya Naitou, Ryota Ichikawa, Masamaka Mori, and Mutsumi Kimura, Comparison of Switching TFT Operation in Output Frequency Dependence of the Artificial Retina using LTPS-TFT, IEEE Electron Devices Society Kansai Chapter 第 22 回 関西コロキウム電子デバイスワークショップ, 2022 年 10 月
- [9] 豊田 航平, 内藤 直矢, 市川 涼太, 森 真崇, 木村 睦, LTPS-TFT 人工網膜の光照射実験におけるスイッチング TFT 動作比較, 薄膜材料デバイス研究会 第 17 回研究集会, pp. 52-55, 2020 年 11 月
- [10] Kohei Toyoda, Naoya Naitou, Ryota Ichikawa, Masamaka Mori, and Mutsumi Kimura, Comparison of Switching TFT Operation in Output Frequency Dependence of the Artificial Retina using LTPS-TFT, AM-FPD '21, 6-3, pp. 160-163, July 2021
- [11] Yuise Sadamura and Mutsumi Kimura, Evaluation of poly-Si TFT as an Optical sensor, IMFEDK 2022, Nov. 2022
- [12] 豊田航平, 薄膜デバイスを用いた完全埋め込み型人工網膜の研究, 龍谷大学大学院 理工学研究科 電子情報学専攻 修士論文, 2022 年 3 月

この研究は、令和元年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、令和 2 ~ 4 年度に実施されたものです。