

「光で動作する人工網膜」を開発

微小太陽電池と立体カーボン電極を組み合わせたデバイスによって網膜の活性化に成功

■ 概要

視覚系の感覚器官である網膜では、視細胞が、外界の光を神経信号である電気信号に変換してくれています。網膜色素変性症などの視覚疾患では、その視細胞が失われてしまうことで、脳が光についての電気信号を受けとることができなくなってしまいます。そうした視覚疾患に対する治療法の一つが、「光起電力型人工網膜 (photovoltaic retinal prosthesis)」です。これは、微小な太陽電池を利用することで眼にはいる光を電気エネルギーに変換し、その電気刺激によって網膜に残存する神経細胞を活性化することで、失われた視覚機能の回復を目指す技術です。

今回、国立遺伝学研究所の松本彰弘助教、米原圭祐教授、オース大学 (Aarhus University) の Rasmus Schmidt Davidsen 助教、オース大学大学病院眼科 Toke Bek 教授、デンマーク工科大学の Stephan Sylvest Keller 教授らによる国際共同研究グループは、微小なシリコン太陽電池と熱分解カーボンからなる立体的な 3 次元電極を高密度に集積した、新しい光起電力型人工網膜を開発しました。近赤外光を照射して発生させた電気刺激により、摘出したマウスやブタ網膜において神経活動を誘発できることを実証しました。本成果は、「微小太陽電池とカーボン電極を組み合わせた立体構造」の有効性を示すものであり、将来的な視覚機能の再建に向けた人工網膜の高性能化につながることを期待されます。

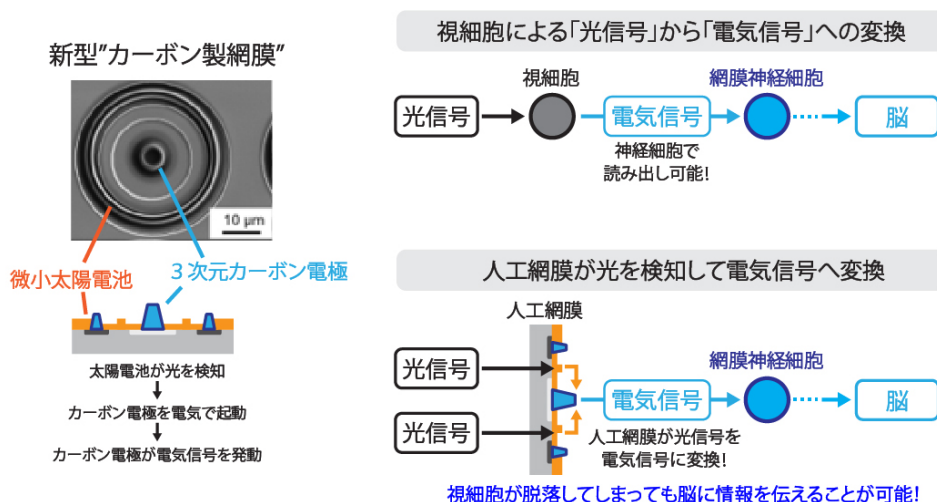


図1. 微小太陽電池と3次元カーボン電極で構成される光起電力型人工網膜

■ 成果掲載誌

本研究成果は、国際科学雑誌「Advanced Healthcare Materials」に 2026 年 8 月 25 日に掲載されました。

論文タイトル

英語: Photovoltaic Stimulation of Mouse and Pig Retina With Pyrolytic Carbon Microelectrodes Integrated on High-Density Silicon Solar Cell Arrays

著者: Akihiro Matsumoto, Pratik Kusumanchi, Jesper Guldsmid Madsen, Asbjørn Cortnum Jørgensen, Gisele Alves dos Reis Benatto, Sune Thorsteinsson, Peter Behrendsdorff Poulsen, Keisuke Yonehara, Toke Bek, Stephan Sylvest Keller, Rasmus Schmidt Davidsen

DOI: <https://doi.org/10.1002/adhm.71651>

■ 研究の詳細

● 研究の背景

網膜色素変性症や加齢黄斑変性症では、光を受容して神経信号である電気信号へと変換する視細胞が、変性・脱落することで、視覚情報を脳へ伝えることができなくなります(図 2)。一方、視細胞から情報を受け取る双極細胞や、情報を脳へ送る神経節細胞などの網膜神経細胞は残存しているため、これらを電氣的に刺激して神経活動を駆動できれば、脳へ情報を伝送することが可能です。

こうした電気刺激によって視覚機能を補う「人工網膜」の開発が進められています。なかでも「光起電力型人工網膜」は、多数の微小な太陽電池を配置し、近赤外光を電気エネルギーに変換して神経細胞を刺激する技術です。私たちが受容する高精細な視覚を再現するためには、太陽電池と刺激電極を小型・高密度化する必要があります。しかし、従来の金属電極には生体適合性や微細金属加工の困難さなどの課題があり、また効率よく神経細胞を刺激するための新たな電極構造材料・デザインが求められていました。

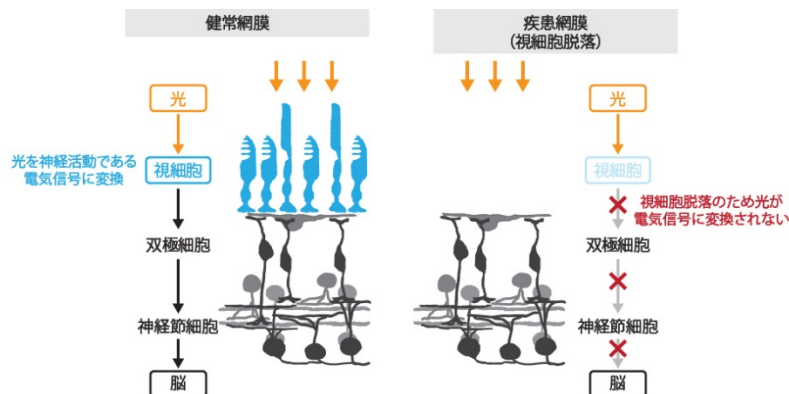


図 2. 健康網膜では、視細胞が光を検出して神経活動として扱うことのできる電気信号に変換し、網膜神経細胞を介して脳へと情報が伝えられる。一方、疾患によって視細胞が脱落してしまうと、光の検出と変換が行われず、脳に情報が伝えられない。

● 本研究の成果

研究グループは、光起電力型人工網膜の新たな刺激電極材料として、熱分解カーボン(pyrolytic carbon)に着目しました。カーボンは生体適合性や化学的安定性に優れ、さらに立体的な構造への加工も可能であることから、神経刺激用電極として有望な材料です。しかし、これまで人工網膜を構成する一つひとつの微小な太陽電池上にカーボン電極を形成する技術は確立されていませんでした。

本研究では、国立遺伝学研究所の網膜生理学グループ(松本彰弘助教、米原圭祐教授)、オーフス大学(Rasmus Schmidt Davidsen 助教)とデンマーク工科大学のバイオエンジニアリンググループ(Pratik Kusumanchi 大学院生、Stephan Sylvest Keller 教授)、オーフス大学大学病院の眼科グループ(Jesper Guldsmid Madsen 研究員、Toke Bek 教授)らを中心とする学際的な国際共同研究によって、新たな人工網膜技術の開発に取り組みました。

半導体微細加工技術を応用し、シリコン太陽電池上に形成した微細な樹脂構造を高温で熱分解することで、太陽電池に立体的なカーボン電極を集積することに成功しました(図 3A)。熱分解には高温処理が必要ですが、この工程を経た後も微小太陽電池の発電性能が維持され、近赤外光の照射によって最大約 0.5 V の電圧を発生できることを確認しました。

さらに、開発した人工網膜を、ヒト網膜の研究モデルとなるマウスやブタ網膜に配置して(図 3B)、近赤外光を照射したところ、網膜神経細胞に神経活動を生じさせることに成功しました(図 3C)。観測した神経活動の活動パターンは、通常の可視光によって視細胞を介して誘発される神経活動と類似していました。さらに、このカーボン電極は 3 次元立体構造をもつため、従来の平面型電極と比較して、網膜神経細胞への接触が良く、より効率的に神経活動を誘発できることを実証しました。

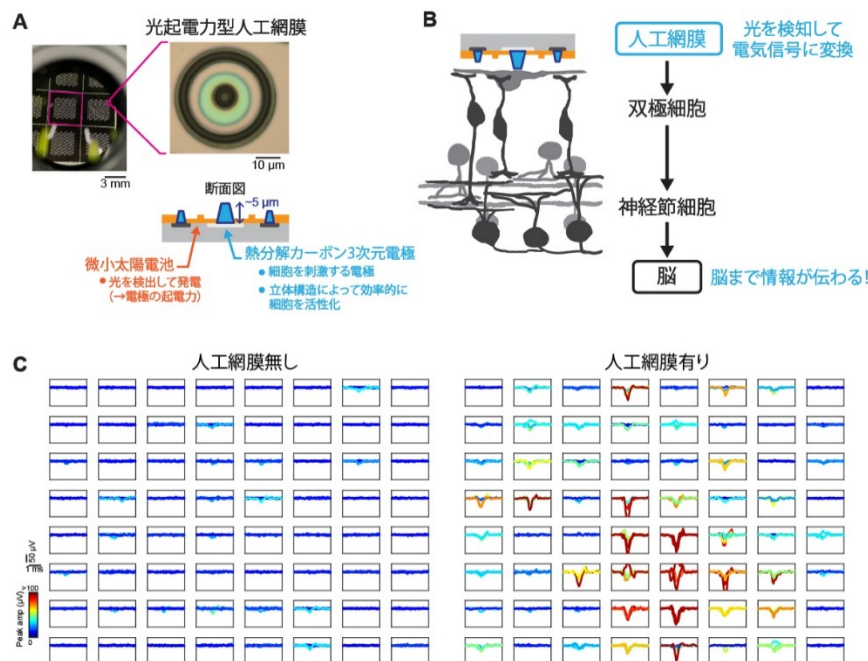


図 3. (A)開発した光起電力型人工網膜。微小太陽電池が光を検出し、太陽電池上に集積させたカーボン電極に電力を供給することで、電極が網膜神経細胞を電気刺激することが可能になる。カーボン電極は立体的に加工してあるため、平面型より細胞への接触が良く、効率的に神経活動を誘導できる。(B)人工網膜移植の模式図。視細胞が脱落していても、残存する網膜神経細胞を人工網膜によって刺激できるため、光信号を脳にまで伝えることができる。(C)マウス網膜での生理実験結果。光刺激に対し、人工網膜が無い場合(左)には神経活動が生じないが、人工網膜を適用した場合には複数の神経細胞に強い神経活動が生じた。

● 今後の期待

本研究により、熱分解カーボンが光起電力型人工網膜の刺激電極として利用できることが示されました。今後、太陽電池のさらなる小型・高密度化や、立体的なカーボン電極の形状・配置の最適化、安全性や長期安定性の検証を進めることで、より高い空間分解能と効率的な神経刺激を両立した人工網膜の実現を目指します。こうした微細材料加工技術、また優れた構造デザインの開発は、将来的には、ヒトへの臨床応用を見据え、網膜変性疾患によって失われた視覚機能をより高い精度で再建するための基盤的技術として貢献することが期待されます。

■ 用語解説

(1) 網膜

視覚系の感覚器官。光を受容して神経信号である電気信号へと変換する視細胞、視神経を介して脳へと情報を伝える神経節細胞など、様々な神経細胞から構成される神経組織。

(2) 網膜色素変性症

視細胞が徐々に変性・脱落していく遺伝性の疾患。初期には暗い場所で見えにくくなる「夜盲」や視野が狭くなる症状が現れ、進行すると視力が大きく低下する。

(3) 光起電力型人工網膜

失われた網膜機能を人工的デバイスによって補い、視覚の再建を目指す「人工網膜」技術の一つ。残存する網膜神経細胞を電氣的に刺激して神経活動を誘発する方法。網膜色素変性症などの視覚疾患では、視細胞が顕著に失われる一方、網膜内の一部の神経細胞は残存する。そこで、光起電力型人工網膜では、網膜に埋め込んだ多数の微小な太陽電池に近赤外光を照射して電気エネルギーに変換し、発生した電気によって網膜神経細胞を刺激することで、神経活動を再建させる。

■ 研究体制と支援

【研究体制】本研究は、国立遺伝学研究所(松本彰弘助教、米原圭祐教授)、オーフス大学(Rasmus Schmidt Davidsen 助教)、デンマーク工科大学(Pratik Kusumanchi 大学院生、Stephan Sylvest Keller 教授)、オーフス大学大学病院眼科(Jesper Guldsmid Madsen 研究員、Toke Bek 教授)らを中心とする国際協同チームによって行われました。

【共同研究機関】オーフス大学、オーフス大学大学病院、デンマーク工科大学

【研究費・支援】Novo Nordisk Foundation(NNF20OC0064628; NNF15OC0017252)、AUFF grant(AUFF-E-

2022-9-43)、Lundbeck Foundation(R303-2018-2898; R344-2020-300; R218-2016-368)、European Research Council(638730)、JST 戦略創造研究推進事業さきがけ(JPMJPR2489)、科研費(22K21353、23H04687、24K02134、24H02311; 23K19412; 25K09816)

■ 問い合わせ先

＜研究に関すること＞

● 情報・システム研究機構 国立遺伝学研究所 多階層感覚構造研究室(研究当時)

助教 松本彰弘(まつもとあきひろ)

メール: aki.matsumoto@nig.ac.jp

＜報道担当＞

● 情報・システム研究機構 国立遺伝学研究所 広報室

メール: prkoho@nig.ac.jp

配付先:文部科学記者会、科学記者会、三島記者クラブ