

生体と調和する無線給電型バイオセンシング素子の開発

Wirelessly Powered Biosensing Device

2171026



研究代表者 早稲田大学

准教授 三宅 丈雄

共同研究者 早稲田大学

教授 吉増 敏彦

[研究の目的]

世界中でヒトやモノへ貼り着ける電子機器「ウェアラブルデバイス」の開発が進んでおり、常時計測・治療など対象者の“今を知らせる”あるいは“その場で治す”デバイスが求められている。バイオエレクトロニクスは、こうした生体/デバイス界面での利用が期待されており、これまでにバイオセンサを始めとする数多くの生体計測デバイスが開発されている。ただし、その多くは生体からデバイスへの一方向の情報伝達であり、かつ、その計測手法は界面電荷（静電容量）を用いた電子制御が主であるため、細胞や組織などウェット環境でイオン制御を行う生体素材には適さないのが現状であった。これら課題に対し、我々は、安全でかつソフトな生体素材ないしは生体模倣材料から構成される新たなウェットデバイスを創出し、ヒトなどと“馴染む計測・治療デバイス”に挑戦している。

ウェアラブル機器の中でも特に我々は眼に装着させるコンタクトレンズに注目した。これは潤いのあるウェット環境で駆動できるIC素子を開発する学術的課題と2020年までにおおよそ77億ドルの市場規模が見込める社会的ニーズを含むからである。コンタクトレンズの主な役割は、視力の低下を補うために装着する補助レンズであるが、近年、電子デバイスを搭載さ

せた“スマートコンタクトレンズ”の開発がGoogleを始めとする多くの企業や大学で進んでいる。しかし、世界のコンタクトレンズ利用者の約8割がソフトタイプを用いているのに対し、開発が進むレンズはPDMSを始めとするハードタイプなのが現状である。これは、水分を90%以上含むソフトレンズ上へ電気回路を作製することが技術的に困難だからである。さらに、ICチップなどの既存集積回路はウェット環境に弱く、潤いのある眼装着用デバイス素子には適さない。そこで、申請者は既に実用化が進んでいる市販のソフトコンタクトレンズに、後述する申請者独自の技術を組み合わせることで、ウェット環境で駆動する無線チップや生体センサ内臓のウェアラブル端末“無線バイオセンシングレンズ”を創出できる着想に至り、挑戦したいと考えている。

[研究の内容、成果]

1. 電磁誘導式無線給電システム

1.1 システム概要

図1に本研究で利用するシステムの概要を示す。眼鏡/コンタクトレンズ間における無線通信は、10 mmの固定距離において、両側で実装されたRLC並列共振回路により実現される。ここで、共振周波数は国際規格に従い、工業・

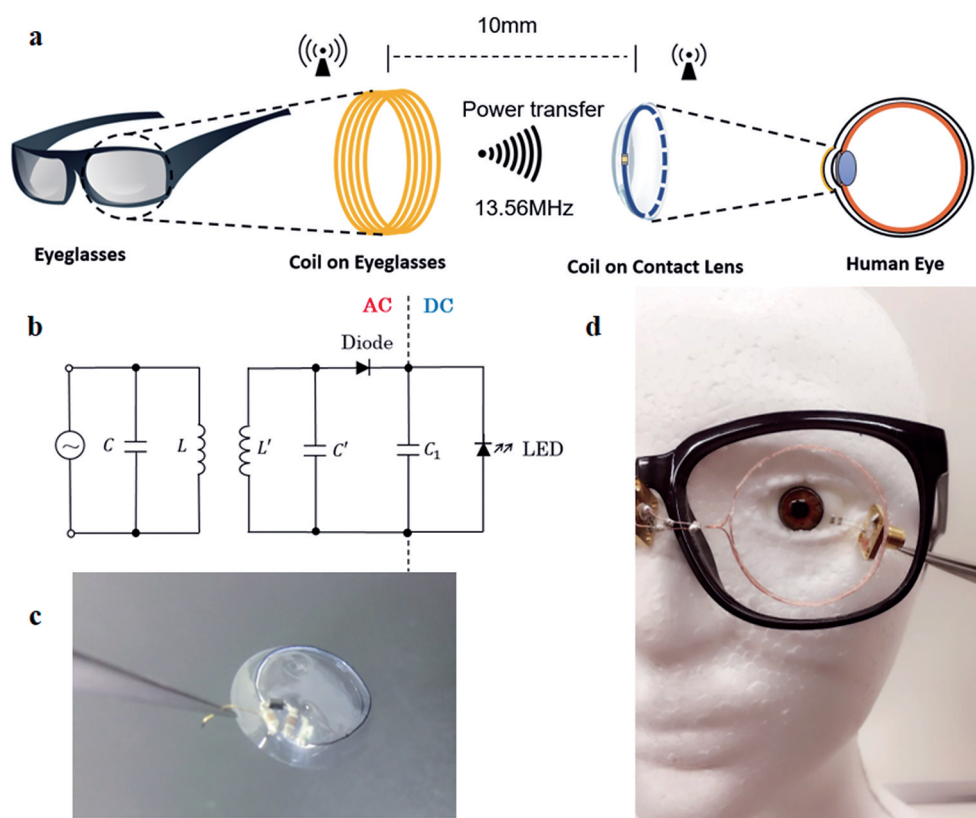


図1 (a) 無線給電システム概要, (b) 等価回路, (c) 無線型コンタクトレンズ, (d) 全体写真

医療用に割り当てられた 13.56 MHz を用いる。本システムにおいて、 C_1 , L_1 は眼鏡側のキャパシタンスおよびインダクタンス成分、 C_2 , L_2 はコンタクトレンズ側のキャパシタンスおよびインダクタンス成分である。

一般的に共振周波数 f は、式 (1) であらわされる。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

13.56 MHz に共振点が来るように、ループアンテナのインダクタンス L と積層セラミックキャパシタ C の値を調整する。13.56 MHz を利用した理由は、無線システムを眼球上に配置しても水の影響を受けない点（波長が 22 m もあるため水分子は振動しないため）と、アンテナサイズを小型化できる点にある。アンテナサイズの小型化は、周波数を高くすることで実現可能だが、マイクロ波帯に入ってくると水透過性が失われるため、生体に適した周波数帯域と

して 13.56 MHz は利用可能である。もちろん、医療を目的とする際は、ARIB STD-21 特定小電力無線局（420-430, 440-450 MHz）や体内埋め込み型医療用データ伝送システム（402-405 MHz）に合わせた周波数帯を要するが、ここでは取り扱わない。

1.2 電力伝送効率

今回作成した RLC 回路を図 1(b) に示す。これらの伝送効率を評価するため、空気中および豚の眼球表面で計測した S_{21} パラメータ（伝送利得）を比較した。図 4 は豚の眼球表面における動作確認図である。各デバイスの S パラメータおよび比較結果を図 5 に示す。メガネ側コイルおよびコンタクトレンズ側コイル共に 13.56 MHz で共振していることがわかる。ただし、コンタクトレンズ側コイルは、直径が 12 mm のループアンテナで一回巻であるため、反射係数が高く、ピークもブロードであった。これらコイルを用いた電力伝送特性は約 -7 dB (20%) を示した。これは、メガネ側から 10

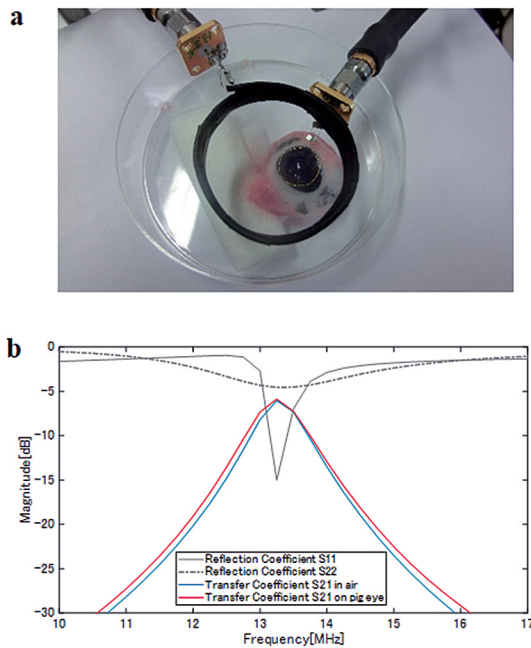


図2 (a) ブタの眼上で無線給電,
(b) 各コイルにおける給電特性

mW 供給した際、コンタクトレンズ上で 2 mW の電力を受け取ることが出来ることを示す。さらに、無線型コンタクトレンズを眼球に載せても水分やブタ眼の影響をほとんど受けないことを確認した。

1.3 導電性高分子を利用した接着

ソフトコンタクトレンズ上へ無線回路の電着は、申請者らの手法 [ACS Macro let. 2012, 1, 400-403] により実装される。図 3(a) は 50 mM の EDOT および 100 mM の LiClO_4 水溶液に浸されたコンタクトレンズと金線の電解重合過程を示している。金線に電気を流すと、コンタクトレンズに含む EDOT が金線上で電解重合される。この PEDOT 重合は、コンタクトレンズ内部まで成長するため、重合量を多くすると強い結合を示す。図 1(c) に示したように、はコンタクトレンズ表面に PEDOT 電解重合され、金のループアンテナとチップキャパシタが電着された。石鹼水で洗浄しても剥がれ落ちることはなかった。図 3(b) では、電解重合の前後でインピーダンス特性 (LCR 成分) が変化していないことから、金線表面に付着した PEDOT が共振回路特性に大きく影響を及ぼさ

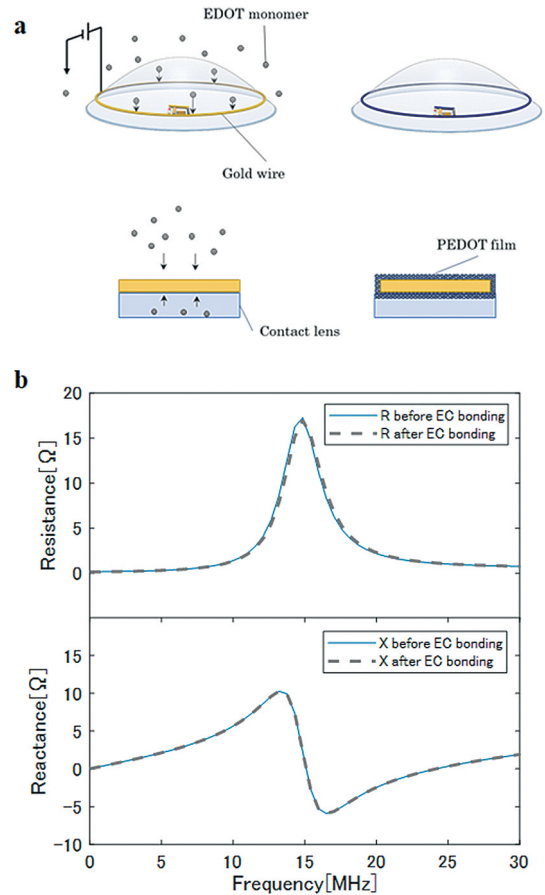


図3 (a) 電着プロセス, (b) 電着前後のインピーダンス計測

ないと結論付けることができる。

1.4 無線型 LED ディスプレイ応用

最後に、LED と本無線給電回路と組み合わせることで、シングルピクセルの LED ディスプレイに取り組んだ (図 4)。無線による給電は AC であるため、LED を点灯させるためには AC/DC 変換回路が必要である。そこで、図 1(b) に示すように、ダイオードとキャパシタを組み合わせた整流回路を作製した。受信側コンタクトレンズで AC2V_{pp} を得た場合、定電圧は 1.7 V 程度得ることを確認した。これは、LED を点灯させるのに十分な電圧であることがわかる。さらに、眼球で電子コンタクトレンズを動作させると、眼の動きに応じて回転する (図 4)。一般に、眼の回転角は、左右で $\pm 35^\circ$ 、上下で $\pm 25^\circ$ となる。そこで、眼の動きを想定した際に、電力利得がどれくらい変化するか評価した (図 4(c))。概ね 15° までは、大きな変

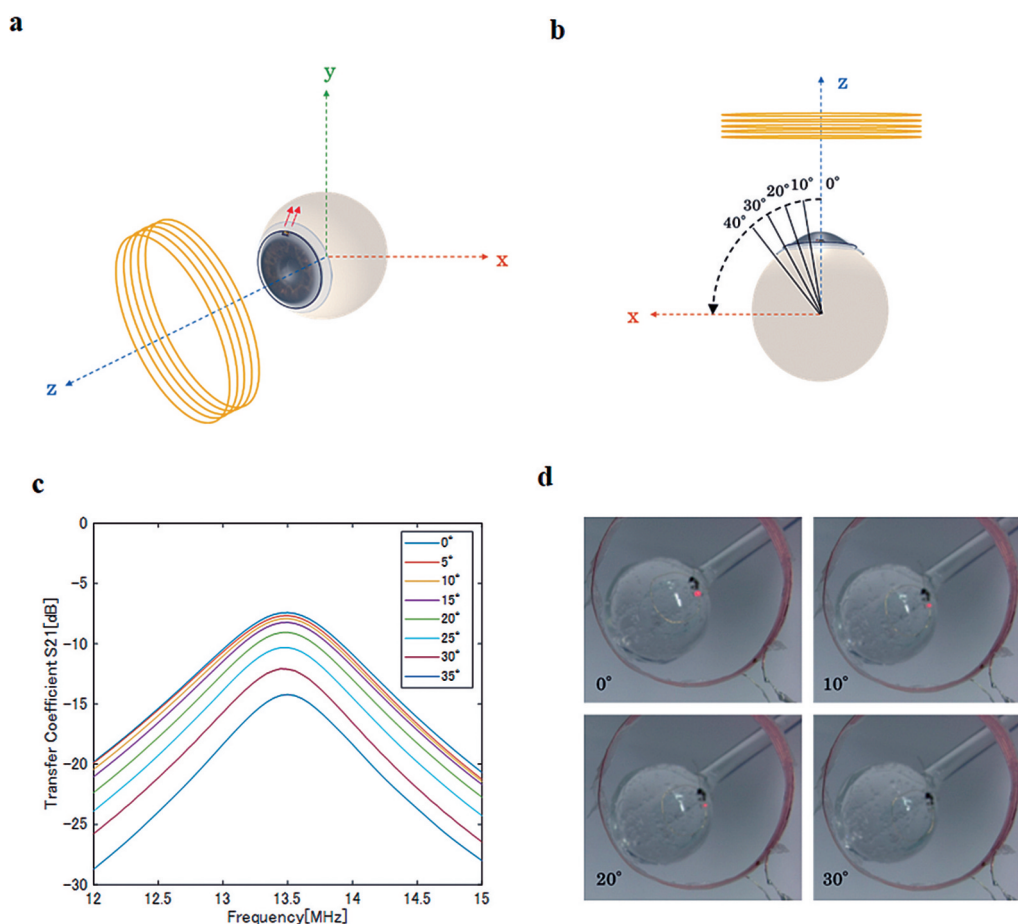


図4 (a-b) 眼球の回転角の概略, (c) 回転角による電力利得評価, (d) 各回転角における LED 点灯の様子

化を示すことはなかったが、20°を超えてくると、利得が極端に減ることを確認した。これは、電磁誘導方式による無線給電は、距離の3乗で変化すること、また、回転により磁場の強さHが変化したことが原因と言える。

[今後の研究の方向、課題]

本研究課題を通して、コンタクトレンズとメガネ間における無線給電の基礎からLED点灯応用までを実現することができた。

現状は、市販のキャパシタなど手に入るサイズを利用して成果を挙げたが、眼球上にデバイスを搭載する際、如何に薄く、そして柔軟な回路を作製するかが重要となる。回路の自作も含め検討していきたい。一方、私の専門は無線よりも、むしろバイオセンサであるため、今後は

センサ素子を搭載した電子レンズの開発に取り組む。センシングの中でも、特に眼においては、含水率や油脂率の計測がドライアイ予防に重要であることから、これら開発にも継続して取り組むたいと考えている。

[成果発表]

おかげさまで投稿論文に関しては、現在執筆中です。以下には、学会発表を記載します。

1. [招待講演] 三宅丈雄, "革新的バイオイオントロニクスの開発", 応用物理学会有機分子・バイオエレクトロニクス分科会研究会, 「有機分子・バイオエレクトロニクスの最新動向と応用展開」2017年6月7日.
2. 高松泰輝, 杜耐珂, 陈云汉, 吉増敏彦, 三宅丈雄, "ソフトコンタクトレンズ上への導電性高分子印刷技術および無線給電システムへの応用", 第7回日本バイオマテリアル学会九州ブロック講演会, 2017年12月8日.

3. Yunhan Chen, Taiki Takamatsu, Toshihiko Yoshimasu, Takeo Miyake, "Smart soft contact lens with wireless power transfer system at 13.56 MHz", 応用物理学会第 65 会春季大会, 2018 年 3 月 17 日-20 日.