

博士論文審査結果報告書

論 文 題 目

生体表面における
無線計測に関する研究

申 請 者
高松 泰輝

情報生産システム工学専攻
先端バイオエレクトロニクス研究

2022 年 2 月

近年加速する少子高齢化や世界的パンデミックの影響により，医療従事者の負担軽減を目的とした医療用計測機器の開発とそのネットワーク化が期待されている．特に，体表・体内で駆動するバイオデバイスは，生体からの電気および化学的な信号を検出することが可能となるため，IoMT (Internet of Medical Things) に向けた新規デバイスとしての期待が高い．しかしながら，体表や体内で利用するデバイスにおいては，柔軟性や生体安全性が求められることに加え，如何にしてウェットな環境でデバイスを駆動させるかという課題が残されていた．

本論文では，ウェット環境で駆動可能な無線式バイオデバイスの開発を目指し，特に眼表で動作するコンタクトレンズ型デバイスを開発対象としている．具体的には，磁界共鳴方式を用いた無線給電とバイオセンサを組み合わせた新規デバイス(無線式バイオセンサ)を開発し，生体適合性やデバイス性能を評価することを主な研究目的としている．無線システムにおいては，古典的な共振結合系の実装に加え，量子力学的効果を含むパリティ・時間(PT)対称性共振結合系という新しい原理の実装にも取り組んでいる．さらに，酵素電極と共振器型アンテナを組み合わせたパッシブ型バイオセンサを開発することで，涙中グルコースや血中ラクテートの濃度変化を無線計測することに成功している．これら成果は，体表・体内で駆動するバイオデバイスの開発において共通する諸課題(生体適合性，電源確保，無線計測)を解決するための新技術を提供するものであり，ひいては，次世代 IoMT デバイスの開発に寄与すると言える．

以下に各章の概要と主な成果を記載する．

第1章「序論」では，バイオデバイス開発の意義とその課題を示している．その後，本研究で主体的に取り扱うコンタクトレンズ型デバイスについて世界の研究動向をまとめた後，本研究の目的と構成を示している．

第2章「ワイヤレス給電システム」では，コンタクトレンズ上に搭載可能な給電素子の設計と市販のコンタクトレンズ上への実装を行い，生体付近で駆動するバイオデバイスへの無線給電に取り組んでいる．本章では，まずワイヤレス給電システムの方式や生体への電磁波影響について示し，本研究で作製するデバイス構造や周波数帯域を決定している．次に，磁界共鳴結合系を用いた高効率なワイヤレス給電システムの開発について，理論計算と実験によって得た研究成果を紹介する．具体的には，高周波回路の電子素子パラメータや共振器間の位置関係によって，電力伝送効率が増加することを示し，最大で約50%の電力伝送効率を得られることを確認している．これは，コンタクトレンズ表面に実装可能な給電用コイルの巻き数と眼鏡側送電コイルとの限界距離を鑑みた実験結果であり，古典回路における理論値とも一致している．一方で，眼鏡側から眼球に向けた無線給電においては，眼球運動に伴う電力伝送効率の低下を考慮する必要がある．そこで，眼球回転運動に即した電力伝送効率の安定性検証や発光ダイオード(LED)の輝度変化を利用した実

証試験を行い、眼球回転角が 15 度以上に達した際、電力伝送効率が著しく低下することを明らかにしている。さらに、開発した給電素子をコンタクトレンズ上に搭載させるため、導電性高分子を用いた電気化学的接着法の開発にも取り組んでいる。結果として、本接着法は無線給電特性に影響しないこと、また、市販のほぼ全てのコンタクトレンズ上に回路素子を接着できることを確認している。

第 3 章「ハイブリッド・ウェアラブル電源」では、体表・体内特有のウェット環境を積極的に利用した新しい発電システムを提案している。第 2 章で作製した無線給電用コイルは、溶液の影響を受けないという利点がある一方で、その電力伝送効率が僅か 10%以下に留まる課題を有していたため(1 巻アンテナを用いた場合)、受信側(レンズ素子)で高電圧が要求される場合、送電側コイルに印加する電力を増大させる必要があった。このことは、生体組織への高周波磁界暴露に繋がるため、安全性に課題を有していた。そこで、本研究ではワイヤレス給電システムと金属空気 1 次電池を組み合わせたハイブリッド電源を開発することで、涙を電解質溶液に用いた昇圧機構を実現させることに取り組んでいる。具体的には、卑金属である亜鉛製共振器アンテナを金属空気電池のアノードとして併用し、バイオカソードである酵素電極と涙の電解質溶液を組み合わせることで、1.5 V のオフセット電圧(V_{DC})を出力できることを確認している。さらに、亜鉛アンテナに無線給電を行うことで、オフセット電圧に交流電圧(V_{AC})が加算される。その結果、ウェアラブル電源の出力を昇圧($V_{DC}+V_{AC}$)させることに成功している。これは、ワイヤレス給電システムと金属空気 1 次電池を組み合わせた世界初の交流/直流電源であり、最大電圧 $0.5 V_{pp} + 2.3 V$ を示す。また、従来の無線給電システム単体と比較した場合、外部からの印加電力は 18.5 分の 1、発生磁界強度は 4.3 分の 1 に削減することに成功している。

第 4 章「酵素電極を用いたパッシブ型バイオセンサ」では、第 2 章で作製した無線給電素子を基盤としたバイオセンサを開発し、体液に含まれる生化学物質の無線計測に取り組んでいる。本研究で考案したパッシブ型バイオセンサは、これまでに研究開発が進む NFC (Near Field Communication) や ASIC (Application Specific Integrated Circuit) タイプのバイオセンサと比較して、集積回路を必要としないシンプルな構造により実装可能となるため、レンズ 1 枚辺りの単価を抑えることが可能となるなどの優位性を示している。本章では、まずバイオセンサと無線情報伝送方式について概説し、最終的に実装するデバイスの通信規格や特性についてまとめている。その後、第 2 章で取り上げた共振器型アンテナと酵素センサを組み合わせたパッシブ型バイオセンサの提案を行っている。具体的には、簡易的な 2 極式電気化学測定器を実装し、LCR (L: インダクタンス, C: キャパシタンス, R: レジスタンス) 共振器の可変抵抗成分として組み込むことで、生化学情報の濃度変化に起因した共振器型アンテナの負荷変調を実証している。その結果、電

気化学測定部をそのまま化学抵抗器として利用し、溶液中グルコースの変化を共振周波数における振幅の変化として無線で測れることを実証している。

第 5 章「PT 対称性を用いた高感度なワイヤレス・バイオセンシング」では、第 4 章で作製したパッシブ型バイオセンサの感度を向上させるため、新しい原理の無線計測システムを提案している。一般的に、体液中の生化学物質は微量であり、従来までの無線計測システムでは、センサ感度が非常に低いという問題が残されていた。そこで、本研究では量子力学的効果が得られる PT 対称性を無線計測システムに導入し、Q 値を大幅に改善することでセンシング感度を高める提案を行っている。本章では、まず PT 対称性について概説した後、無線バイオ計測として PT 対称性を導入する意義について記述している。次に、従来の磁界共振結合系（ロス-ロス結合）に対して、PT 対称性を満たす磁界共振結合系（ゲイン-ロス結合）では、Q 値が約 125 倍向上することを確認している。この Q 値の向上は、従来型のエネルギーを消費する散逸系では達成不可能であり、PT 対称性を導入した保存系においてのみ観測される現象である。次に、この PT 対称性を有する磁界共振結合系と第 4 章で作製したパッシブ型バイオセンサを組み合わせた高感度な生化学情報の無線計測について記述している。PT 対称性を満たす結合系は、その結合係数の変化により、Broken-PT と EP（特異点）という状態をもつことが分かり、それぞれ線形増幅されたシステム応答（センシング感度：2000 倍）と閾値的なシステム応答を示すことが明らかとなった。また、共振器間に生体組織を挿入した場合においても、PT 対称性を満たす無線計測が可能であることを実証したことで、体内埋め込み型デバイスとしての実用可能性を示している。

第 6 章は「結論」であり、各章のまとめを含めた総括を行っている。

以上が本研究の成果であり、これらを要約すると、磁界共鳴結合方式を利用することで、体表で駆動するバイオデバイスへの無線給電、および体表から得られる生化学情報の無線計測を実現している。とりわけ、体表側共振器に酵素電極を組み合わせることで、世界初のハイブリッド電源やバイオセンサの構築が可能であることを実証している。さらに、PT 対称性という新しい原理の無線計測システムは、体表のみならず、体内利用にも適用可能であるため、将来の IoMT デバイスへの応用が期待できる。よって本論文は、博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2022 年 1 月 22 日

審査員

主査	早稲田大学教授	博士(工学)(早稲田大学)	三宅丈雄
	早稲田大学教授	工学博士(アーヘン工科大学)	巽宏平
	早稲田大学教授	博士(学術)(神戸大学)	吉増敏彦
	早稲田大学教授	博士(工学)(東北大学)	高橋淳子