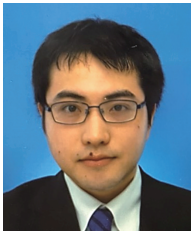


[研究助成 (A)]

有機電子回路とハイドロゲルを融合した
生体計測用ソフト電子デバイスの開発Development of a soft electronic biomonitoring device
using organic electronics and hydrogels

2201032



研究代表者

中央大学 理工学部
電気電子情報通信工学科

助 教

吉 田 昭太郎

[研究の目的]

無機物（シリコン、金などの金属）をベースにした電子回路技術が高度に発達を遂げた近年において、電子デバイスを生体センシング・モジュレーションに応用する研究が盛んに行われている。モノのインターネット（Internet of Things, IoT）の構築とサイバーフィジカルシステム（Cyber Physical System）の実現が重要な社会基盤技術として認識され急ピッチで開発が進められている昨今において、生体にとりつける電子デバイス：ウェアラブルエレクトロニクスと、生体に埋め込む電子デバイス：インプラントブルエレクトロニクスも重要な役割を持つ。例えば、生体信号（脳波、心電図、筋電、汗成分など）を日常的に身に着けてセンシング可能な電子デバイスがIoTに接続された場合、我々は自分の健康情報を病院に自動的に送信し、医師から診断を受けることができるようになる。従来、病院に行って長い待ち時間を過ごし、大きなコストを払っていた医療が、分散型の医療健康モニタリングシステムによって革命的に低コスト化され、我々の暮らしを豊かにすることが期待できる。また、埋め込み型デバイスにおいても体内情報を外部インターネットに送信し、また外部情報から操作されることによって、遠隔で治療を行えるようになることが期待できる。

このような生体用電子デバイスは様々なものが開発されてきたが、現在主なものは無機物製の電子回路をベースとしており、その本質的な特性に由来する「硬さ」「厚さ」は柔らかい生体高分子（脂質やタンパク質）で構成される生体とミスマッチしており、装着するには違和感が強く、また体の運動に伴って変形できないことから体表・体内を傷つけてしまう問題がある。従って、ウェアラブルエレクトロニクスは未だ日常的な利用を行えるほど普及しておらず、インプラントブルエレクトロニクスはペースメーカーや頭蓋内電極などその応用が限られている。

このような生体用電子デバイスをより生体に着けても違和感なく、生体を傷つけないものにするための一つの方法として、本研究では有機物（生体高分子）で構成される生体と同じく柔らかく生体適合性の高い有機物で電子回路を構築し、それを生体を構成するコラーゲンのような水を多量に含むハイドロゲルで包埋した「すべて有機物で創る」電子デバイスの構築を目的とする（図1）。これまでに、生体に対して電気刺激・記録を行うシステムとして全てが有機物で構成されたものは存在しない。有機物の電極、絶縁被膜、生体とのインターフェース部分を融合させる技術は未だほとんど検討されておらず、従って刺激・記録を行う電極を駆動する有機電子回路の製作とその統合法の研究も未熟

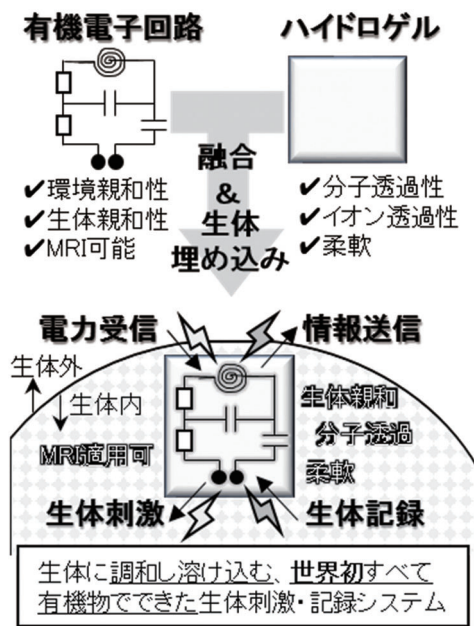


図1 本研究の概念図

である。生体に調和する、柔らかく分子やイオンを透過する電子デバイスを生命と同じ有機物で構築するマイクロナノ加工技術・方法論を立ち上げ、それら必要な要素技術の開発を世界に先駆けて行うことで、再生医療や創薬に用いる細胞の電気刺激デバイスや、脳に安全に貼りつく脳波計測デバイスなど、これまでにない水で濡れたウェット電子デバイスの分野を開拓する。

具体的な技術課題として下記が挙げられる。まず生体を電気刺激・記録する電極を、電気分解を起こしにくいカーボンと導電性高分子を駆使したオーガニック電極で構築する。そのオーガニック電極を局所的に絶縁被覆する部分もシリコンやパリレンなどの柔軟な有機素材をマイクロナノ加工することで構築する。生体外からシステムに電気刺激用の電力を受信する、または生体内で電気記録した生体情報を体外へ送信するために、電極に有機物でできたコイル・コンデンサ・抵抗からなる有機電子回路を統合する。それらを一体にまとめるため、栄養などの分子を透過し生体に柔らかく接触させることができる、有機物でできたハイドロゲルで全体を覆う。このシステム全体を生体に埋め込むことで、MRIでハレーションを起こさずに生体

に調和し溶け込むオーガニック生体刺激・記録システムとして利用可能にする。

〔研究の内容、成果〕

本研究における技術課題は前述の通り以下の4つである。(1) 生体を電気刺激・記録する電極を、電気分解を起こしにくく生体適合性の高いオーガニック電極で構築する。(2) オーガニック電極を局所的に絶縁被覆する部分をマイクロナノ加工することで構築する。(3) 生体外からシステムに電気刺激用の電力を受信する、または生体内で電気記録した生体情報を体外へ送信するために、電極に有機物でできたコイル・コンデンサ・抵抗からなる有機電子回路を統合する。(4) それらを一体にまとめるため、栄養などの分子を透過し生体に柔らかく接触させることができる、有機物でできたハイドロゲルで全体を覆う。以下、項目ごとに研究内容と成果を述べる。

(1) 生体を電気刺激・記録するオーガニック電極

従来の、もともと生体には存在しない銅・白金・シリコンなどをベースにした「無機物」電極は、電気分解による気体発生を起こしやすく生体にダメージを与えてしまう問題、硬い無機物システムが柔軟な生体の動きに追従できず生体を傷つけてしまう問題、MRI撮像でハレーションを起こす問題があった。これを解決するために、電気容量が大きい電気分解を起こさず、MRI適正があるカーボン繊維と導電性高分子 PEDOT の複合体を形成しオーガニック電極を構成した(図2左)。

(2) 有機物材料による局所的絶縁

水に濡れた状態で使用するウェット電子デバイスを構築するにあたり、導電性の部分と絶縁性の部分を有機材料のパターニングによって作り分ける技術の確立が必要であったため、柔軟なカーボン繊維を切り取り加工し、それに局所

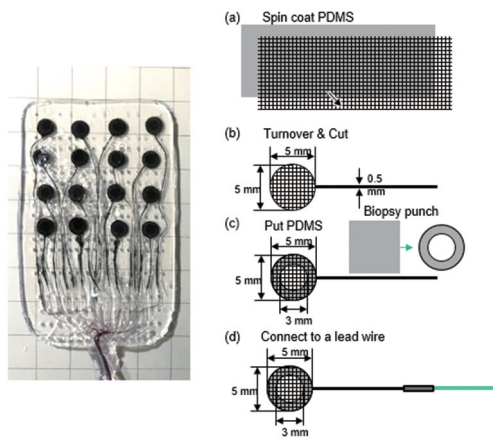
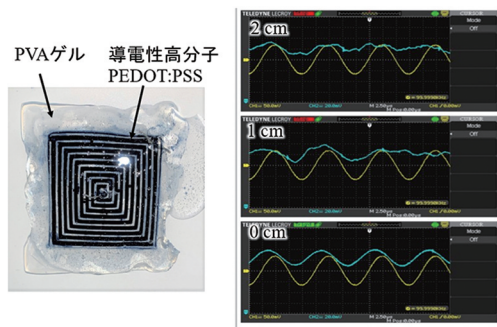


図2 製作したオーガニック電極（左）と、有機物材料による局所的絶縁技術の開発（右）

的に柔軟な有機エラストマー材料を微細加工したものを接着する工程を開発した（図2右）。

(3) 有機電子回路の構築

有機電子素子として、抵抗、コイル、コンデンサを有機物とハイドロゲルで構築するプロセスを開発した。有機抵抗はカーボン繊維に導電性高分子 PEDOT を塗布する、電極と同様の方法で構築した。有機コイルは3D プリンタを用いて製作した鋳型を用いてコイルの形状の溝を有するハイドロゲルを構築し、その溝の中に導電性高分子 PEDOT をインク上にしたもの注入して、最後にハイドロゲルを流し込み全体を覆うことで構築することができた（図3）。金属の送信用コイルを用いてこの有機コイルに電力伝送できるか調べたところ、送信用コイルと有機物コイルの間の2, 1, 0 cm と間隔を狭め



右は送信用金属コイルとの距離（2, 1, 0 cm）を変えた時の、有機コイルへの電力伝送の様子

図3 開発した有機物コイルをハイドロゲルで包埋した構造を持つ有機電子素子

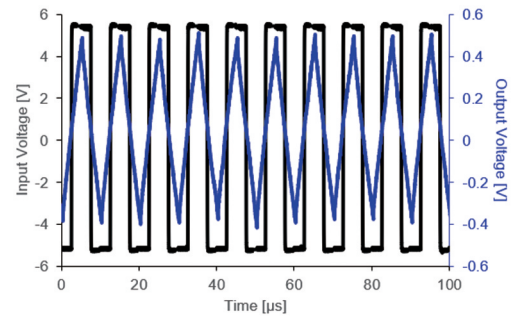
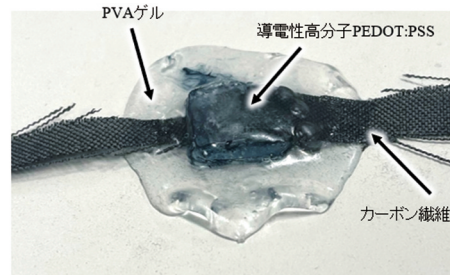


図4 開発した有機コンデンサと、それによる矩形波の三角波への変換

ていくと電力が伝送できることが分かった（図3右）。受信波は送信波のおよそ0.54倍となった。それぞれの電圧波形の周波数は共に100 kHzでファンクションジェネレータから入力した周波数と一致した。送信波計と受信波形では位相はずれており、送信波の周期が10 μsであることを考えると0.17周期分（1.7 μs）ずれが発生していた。

また、有機コンデンサも導電性高分子による2枚の板状の構造でハイドロゲルを挟むことで構築できることが分かった（図4）。これに入力した矩形波の電圧波形を三角波の出力波形として変換して出力できることが分かった。以上より、有機物とハイドロゲルのみを用いて抵抗、コイル、コンデンサという電子回路の基本素子を構築する技術を開発できた。

(4) 生体親和性ハイドロゲルによる統合

上記図2, 3, 4に示すように、それぞれ有機物製の電極と電子素子を、ハイドロゲルで包埋するプロセスを開発することができた。カーボン繊維は高い比表面積を持つことにより、界面電気容量が高く、また柔軟性を持ちながら指で押さえても壊れない程度の剛性を持ち合わせて

いるため、電極や抵抗の単体として適する。これに未硬化のハイドロゲルを塗布して固めることで、繊維の隙間にハイドロゲルが侵入することで強固に両者が接着された。一方で、カーボン繊維は寄生容量も高いことが分かったため、コイルとコンデンサは導電性高分子のみをハイドロゲル中に導入用の構造を作ることによって包埋するプロセスを開発した。

今回用いたポリビニルアルコール（PVA）ハイドロゲルは、生体適合性が高いことが知られており、埋め込みにも用いることが可能である。また、脆く指で押さえると崩れてしまう生体高分子ハイドロゲル（コラーゲン、ゼラチンなど）と比べて指で持っても壊れない剛性と、柔軟性を持っている。従って、生体用有機電子デバイスを包埋し保持する材料として適すると考えられる。

[今後の研究の方向，課題]

本研究により、有機材料とハイドロゲルのみで生体計測用に適した電子デバイスを構築する

ための基礎技術を開発することができた。今回開発したデバイス製作プロセスにより、有機物のみでウェアラブル・インプラントデバイスに適する電子デバイスを作るための基礎技術を確認してきたことから、今後は各電子素子を用いて機能的な電子回路を構築する予定である。また、近年開発が進んでいる有機トランジスタも組み合わせて、増幅器などの信号処理部を有する発展的な有機電子デバイスを構築する予定である。また課題としては、有機コイルにおける電力伝送効率の向上および磁気共鳴方式への変更による伝送距離の向上、有機コンデンサにおけるキャパシタンス値の設定方法が挙げられる。本研究をさらに推進することで、すべて有機物でできた柔らかく人体に親和性の高い電子デバイスを構築していくことができると考えられる。

[成果の発表，論文等]

なし（今後、学会及び国際論文誌で発表予定）