

[研究助成 (B)]

生体内デバイスのための超フレキシブル電力伝送装置開発

2221904

研究代表者
(助成金受領者)

九州大学 先導物質化学研究所

准教授

藤 田 克 彦

共同研究者

防衛医科大学校 生理学教室

教授

守 本 祐 司

[研究の目的]

今後、医療や身体能力の向上のため人間の体内に埋め込むタイプの機械・装置が広く用いられることになる。体内への導入や内臓への影響を極小化するためには高い柔軟性が必須であり、持続的な利用には無線給電が用いられるだろう。柔軟な電子回路を作製でき、有害元素を使用しない有機半導体は、各種センサーへの応用が始まっているが、能動機器の駆動に必要な電力の無線給電のためには高周波数特性や電気抵抗の点で大きな課題を抱えている。本研究では低電気抵抗の高周波数受電装置を有機フレキシブル回路で実現し、内臓のごく近傍で駆動する能動機器の電源問題を解決し、健康維持や能力拡張の機械の発展を促進することを目的とした。

応用デバイスとして医療目的の光線力学療法(PDT)に対する光源装置の開発を行った。体内埋め込み装置では、生体センサーやペースメーカーなど μW レベルの消費電力の装置は埋め込まれた電池の交換で対応できるが、光治療効果に必要な照射強度の装置を体内に埋め込む場合は無線給電が必須となる。内蔵ガン治療器機としてフレキシブル有機EL光源としたPDTガン治療の実証を行った。

[研究の内容, 成果]

上記目的を達成するため、本研究では以下の4つの研究を実施した。内容と成果をまとめる。

1. 有機半導体によるpn接合ダイオードの高周波特性と熱耐性の改善

従来、有機半導体ダイオードはフレキシブル性や有毒元素非仕様などの点ですぐれていたが、周波数特性が低く、無線給電でのQi規格周波数(110 ~ 205 kHz)での動作はできなかった。我々が開発したESDUS法の難溶性ドーパントが使用可能であることや、連続成膜による積層構造の構築が可能であるといった利点を活かし、Qi規格周波数での整流可能な有機半導体回路を作成することに成功した(図1)。

次の課題はダイオードの耐久性であった。特に連続駆動時のジュール熱による熱劣化の抑制を課題として半導体材料のスクリーニングを行った。様々な材料での熱劣化特性を比較したところ、最も大きな劣化はドーパントの拡散にともなうpn接合面の導電性低下であることを突き止めた。ドーパントの拡散は半導体材料の

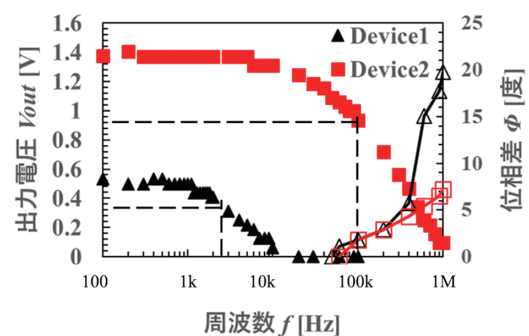


図1 整流特性の周波数依存性:従来の有機半導体ダイオード(Device1)に比べ、ESDUS法で作成した有機半導体ダイオード(Device2)は周波数特性が劇的に改善した。

ガラス転移温度 (T_g) 以上で顕著にみられることから、 T_g の高い半導体材料を用いることで熱劣化を抑制したダイオードの開発に成功した (図 2)。

2. 生体内への無線給電技術の開発

実験動物用の小型体内埋込ワイヤレス受信装置を開発し、生理食塩水中およびラット体内への電力伝送実験を行った。電力測定配線による伝送電磁波の擾乱が無視できないことから、有機 EL 発光素子を用いて発光輝度で伝送電力を見積もることにした (図 3)。

受信アンテナを 20 μm の絶縁フィルムで被覆しただけでは電力伝送効率が極めて低く、発光しないため見積もることができなかったが、1 mm 以上のフィルムで被覆することにより電力伝送が可能となった。これは外部誘電率が高い

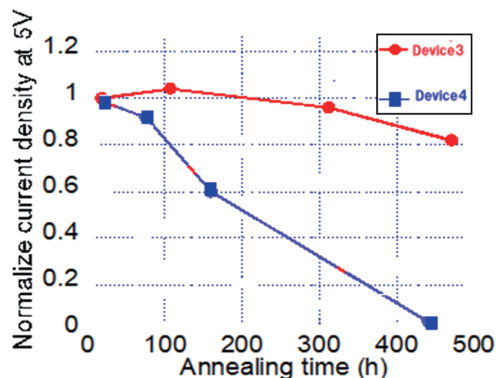


図 2 有機ダイオードの 100°C における熱劣化特性
Device3 P3HT/F8BT($T_g=140$), Device4 P3HT/MEH-PPV($T_g=65$) n 層に T_g の高い F8BT を用いることで熱耐性を向上させることができた。

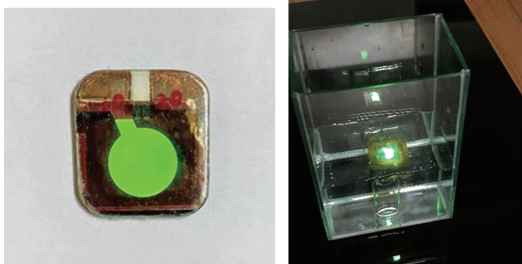


図 3 (左) ラット用体内ワイヤレス有機 EL 受電装置 (右) 生理食塩水中での無線給電発光

状態では電磁誘導効率が極めて低くなることに対応し、食塩水との間隔を 1 mm 程度保持することで十分な電磁誘導が誘起されることがわかった。送電装置からの距離 2 cm で、生理食塩水中での発光輝度から見積もった伝送電力は大気中でのその 90% を保持することがわかった。また、有機 EL 素子の電極による電磁波の擾乱はフェライトの挿入により完全に除去することもわかった。

生理食塩水中で十分な電力伝送を示した発光デバイスをラット体内に埋設したところ体内でもほぼ同程度の電送効率を示すことがわかった (図 4)。

3. 生体内設置フレキシブル装置の生体適合性表面処理法の確立

フレキシブル基板表面を様々な材料で被覆し、マウス体内で 1 ヶ月間埋設して炎症や拒絶反応が起きないかを試した。未修飾の基板では拒絶反応に基づく白化が見られたが、パリレン CVD 膜、医療シリコン、MPC ポリマーで被覆した基板では炎症や拒絶反応は見られず、良好な生体適合性を示した。

腹腔内に埋設した場合でも内蔵や腹膜に対して十分な生体適合性を示すことがわかった。今後は最も密閉性の高いパリレン CVD 膜を最表面層に用いることとした (図 5)。



図 4 ラット体内で発光するワイヤレス有機 EL 受電装置
ラット腹腔内に埋設し送電装置上に固定、受電装置 - 送電装置距離 2 cm

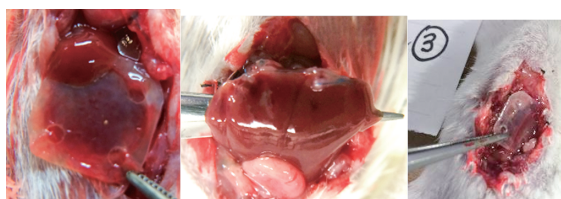


図5 表面被覆したPETフレキシブル基板をマウスに1ヶ月埋設して取り出した様子。左からバリレンCVD、医療シリコーン、MPCポリマーで被覆したもの。いずれも拒絶反応や炎症はみられない。

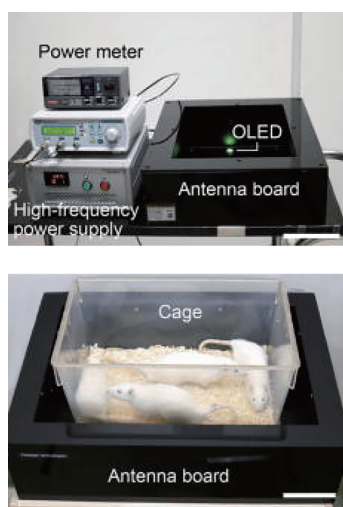


図6 ラットケージ付送電装置

4. 無線給電有機ELによるガン治療効果の実証

PDTでは、ガン組織に蓄積されやすい光増感剤を投与し、ガン細胞に蓄積される時間を待って、光照射することで、増感剤から発生する活性酸素がガン細胞のアポトーシスを引き起こす。ラット体内への電力伝送を行うためのラット飼育ケージ付送電装置（図6）を作成した。

ラット用体内ワイヤレス有機ELを肝臓ガン細胞を移植したラットの肝臓に貼り付けた。光増感剤（mTHPC）を静脈注射したのち、光照射を4日間行った群と2日目にもう一度増感剤を投与して、4日間光照射した群とコントロール群として光増感剤を投与せず、光照射のみを行った。ラットを解剖し、肝臓の生検を行った。以下に結果を示す。

図7（a）では、Control：増感剤投与しないものは肝臓全体に赤黒のガン組織が広がってい

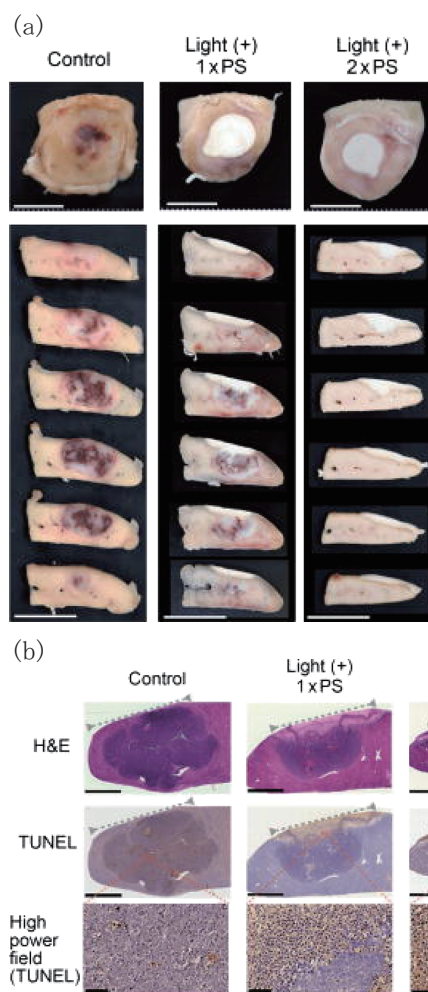


図7 PDT後のラット肝臓の生検結果

- (a) 肝臓の上面図と2 mm 間隔でスライスしたもの
(b) 肝臓スライスをH & E染色したもの、タネル染色したものとその拡大図

るのに対し、増感剤を投与した群ではいずれもガン組織は顕著に縮小し、2回投与した群ではガン組織はほぼ消失している。光照射を行った部分では組織が白化しており、壊死した細胞が固まっている。(b)について、H & E染色ではガン組織は濃赤紫色となるが、光の到達した部分でガン組織が消失しており、2回投与した群ではガン組織がほぼ消失している。タネル染色ではDNA鎖の断片化を検出できアポトーシスした細胞が黄土色になるが、ガン組織がなくなった領域が染色されていることから、熱変成死ではなく、活性酸素発生によるPDT効果によりガン細胞が死滅していることを示している。

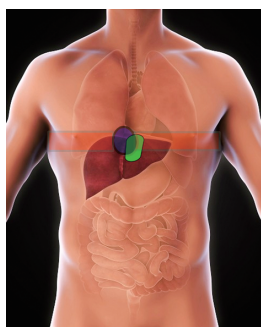


図8 ポータブル外部電源と内臓に貼付したワイヤレスフレキシブル有機EL光源の構想図

本法が内臓ガンに対して有力な治療法となることを明確に示す結果となった。

5. まとめと今後の展望

本研究では人体内で駆動する機械装置のために体外から無線給電を行うシステムの開発とその医療応用の可能性を示した。有機半導体デバ

イスは薄型フレキシブルで炭素ベースであり、生体との相性がよい。電力伝送に必要な周波数特性や熱安定性を確保できる目処が付いたことから、今後は広い応用が期待される。また、体内設置光源による PDT は今後ガンの在宅医療を可能にし、通信器機を複合したスマート治療に発展していくものと期待される（図8）。

[成果の発表, 論文など]

Yujiro Itazaki, Kei Sakanoue, Katsuhiko Fujita, Izumi Kirino, Kazuhiro Eguchi, Yutaka Miyazono, Ryoichi Yamaguchi, Takasumi Tsunenari, Takao Sugihara, Kenji Kuwada, Naoki Kobayashi, Tsuyoshi Goya, Katsuyuki Morii, Hironori Tsujimoto, Yuji Morimoto, “Metronomic photodynamic therapy for deep organ cancer by implantable wireless OLEDs” APL Bioeng. 9, 026113 (2025)

“Wireless OLED metronomic photodynamic device kills deep organ tumor cells in rat model” Scilight 2025, 181105 (2025)