

博士論文（要約）

フレキシブルコイルによる  
人工心臓用経皮エネルギー伝送に関する研究

村上 遥

## 論文の内容の要旨

論文題目 フレキシブルコイルによる  
人工心臓用経皮エネルギー伝送に関する研究

村上 遥

重症心不全の治療方法としての心臓移植は、改正臓器移植法が施行されドナーが増加した 2016 年 10 月 31 日現在でさえも、537 人の待機患者に対し移植件数は年間 41 件に留まっている。人工心臓は心臓のポンプ機能を補う機器であり、1957 年に動物実験が成功したのを皮切りに国内外で研究開発、実用化が進められてきた。現在、国内の人工心臓は心臓移植までの待機を目的とした **Bridge to transplant (BTT)**用途であり、長期補助の必要性から血液ポンプの小型高性能化と体内植え込み化が進んだ。2011 年には国産の補助人工心臓である **EVAHEART** と **DuraHeart** が保険収載され、在宅待機で日常生活を送る装着患者も年々増えてきている。しかし、現在臨床応用されている補助人工心臓は電源供給のために皮膚を貫通するドライブラインで体内外の機器を接続しており、貫通部位から感染症が発生するというリスクが依然として残っている。

経皮エネルギー伝送 **Transcutaneous energy transmission system (TETS)**とは、この皮膚貫通ドライブラインをなくし、ワイヤレスで電力伝送する技術のことである。原理としては主に電磁誘導が利用されており、体内外にコイルを

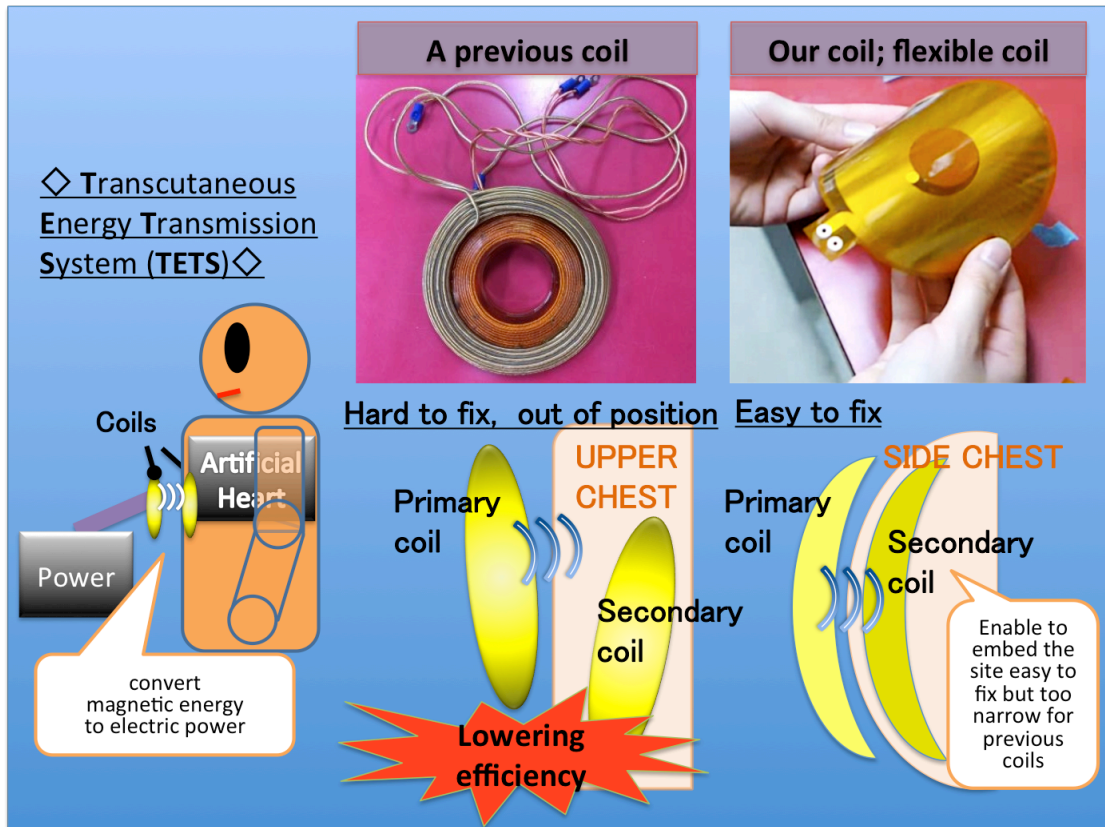


Fig. 1 経皮エネルギー伝送概略および従来コイルと本論文提案コイル、フレキシブルコイルの差異

置き、体外側コイル（一次コイル）に交流電流を流すことで、体内側コイル（二次コイル）に変動磁場が鎖交し電流が誘導されて電力伝送される仕組みである。TETS は 1961 年に本格的に研究が開始され、米国で 2 機種の人工心臓、LionHeart と Abiocor について臨床試験が行われるまでに至ったが、現在は製造販売が中止となっている。

TETS の大きな解決課題のひとつとして体内外コイルの相対位置がずれて伝送効率が落ちてしまう「位置ずれ」の問題がある。従来の TETS 用コイルは導線を巻いて作製した堅くかさばるものであるため埋め込み位置が前胸部に限ら

れ、ドレッシングパッチで一次コイルを位置固定するものの、腕や筋肉の運動で位置ずれが発生することは防げない。従来の TETS では位置ずれの問題を解決するために TETS 用コイルの形状を円錐状にしたり、駆動回路による効率低下への補償による方法が主流となっていた。

本研究では位置ずれによる効率低下に対して対策をするのではなく、薄く湾曲可能なコイルをフレキシブル基板で作製したフレキシブルコイルを設計、試作し、人工心臓用 TETS を実現することを目的とする (Fig.1)。フレキシブルコイルを用いることで、側胸部等の位置ずれし難い場所に埋め込むことで位置ずれの問題自体をなくすことが可能であり、さらに、フレキシブルコイルは 1 枚 5g 程度と軽いため従来の 100g 程度の重量のコイルと比べ、周辺組織への圧迫を軽減することも期待できる。

フレキシブルコイルは厚さが 100  $\mu\text{m}$ 、銅箔厚さが 35  $\mu\text{m}$  と薄いため、抵抗値が高くなりやすいという課題があった。6 種類のコイルの試作により、直径 106 mm、片面 1 巻の両面コイルを 5 枚直列に接続にすることで、従来と同程度の直列等価抵抗 0.567  $\Omega$  を達成し、インダクタンスは従来の 5 分の 1 程度の 16.78  $\mu\text{H}$  となったが、埋め込みの際にワーストケースと想定されるコイル間距離 20 mm 離れた際、8 W 程度を伝送することができた。

次に、作製したフレキシブルコイルをシリコンパックに封入し、ヤギを用いた動物実験において伝送実験を行った。従来手法の電磁誘導に比べ高効率で伝送可能な共鳴共振を目指した伝送により、30 V 入力した際に最大出力電力 15.7 W、最大伝送効率は従来 TETS を上回る 0.88 を得られた。平均伝送効率が最大となった 1 日の間における伝送では平均出力電力 10.3 W、平均伝送効率

0.72 を得ることができ、その際の体内コイルの温度および体外コイルに接したヤギ皮膚温度は低温熱傷の可能性のある 43℃を長時間上回ることはなかった。38 日目に二次コイルの取り出しを行い、二次コイルが体内の曲面に沿って埋まっていたこと、全体が完全にカプセル化されていた (Fig.2) ことから、組織適合性でも優れていることが示された。

以上により、経皮エネルギー伝送の位置ずれ問題の解決手段としてフレキシブル基板で作製した TETS コイルは伝送面および生体適合面で有用であることが示され、人工心臓の半永久使用 Destination therapy (DT)を実現する際、より生活の質 Quality of life (QOL)を高められるものと考えられる。

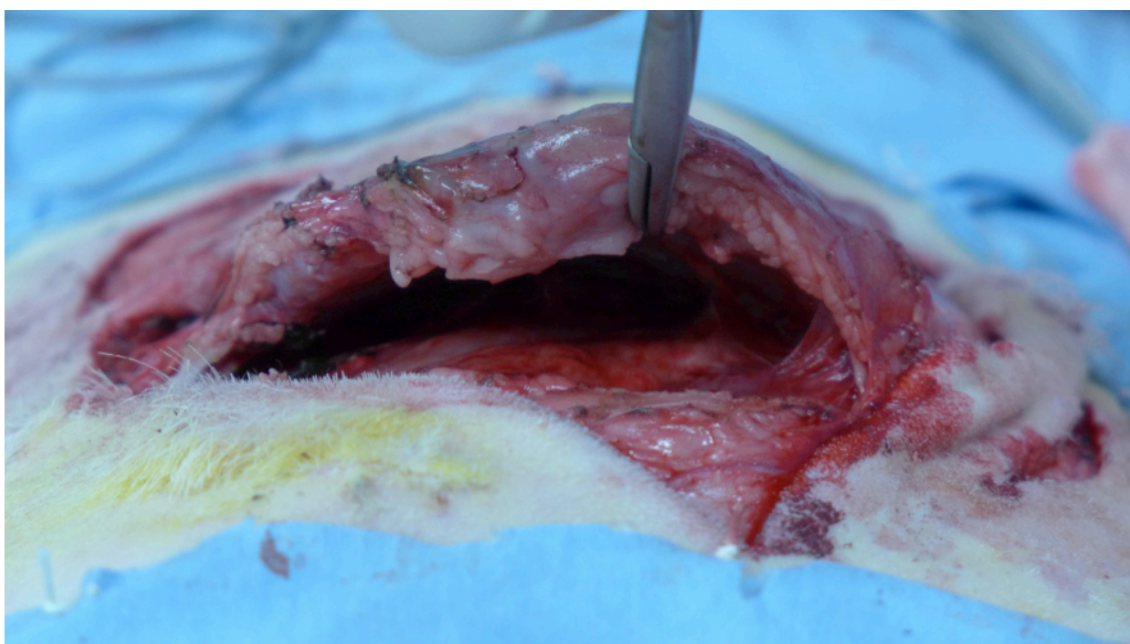


Fig. 2 ヤギに埋め込まれた二次コイルが胸壁の曲面に沿って曲がっている様子