

令和 5 年 4 月 7 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04507

研究課題名（和文）手術ロボットに適用可能な超小型マイクロ波エネルギーデバイスの開発

研究課題名（英文）Development of tiny microwave energy devices for robotic surgery

研究代表者

齊藤 一幸（Saito, Kazuyuki）

千葉大学・フロンティア医工学センター・准教授

研究者番号：80334168

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：今日の外科手術では、従来の開腹手術のみならず、腹腔鏡手術や内視鏡的手術、さらには、手術ロボットによる高精細手術（以下、ロボット手術）といった低侵襲な手技が広く行われている。これらの手術では、生体組織の切開や止血を同時に行うことができるエネルギーデバイスが多用されており、この代表格が電気メスである。ところが、電気メスによる処置時には大量の煙が生じるといったような解決が難しい問題もある。そこで本研究では、使用時に煙を発生させずクリーンな処置を実現でき、かつ、安全性が高いマイクロ波による外科処置デバイスに着目し、ロボット手術に対応する微細なマイクロ波エネルギーデバイスを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、マイクロ波を含む電磁界の生体作用に関する研究では、体外より電磁界を作用させた場合の研究が広く行われている。一方、本研究で行った体内に電磁波源が位置した場合や電磁波源が体表に接触している場合の生体内外での電磁波の挙動を解析するという事はあまり行われておらず、本研究の成果は貴重なデータになり得る。

一方、現在、外科手術に用いられるエネルギーデバイスにおいては、機器に関する工学的な特性解析はあまり行われていない。外科手術の現場では、常に、使い勝手のよい優れたデバイスが求められているため、本研究で開発したデバイスが実現できれば、より高品質なロボット手術が実現できると期待できる。

研究成果の概要（英文）：In the modern surgery, minimally invasive techniques such as laparoscopic surgery, endoscopic surgery, and even robotic surgery are widely used in addition to the conventional laparotomy. In these techniques, energy devices that can simultaneously perform tissue incision and hemostasis are widely used, and the electrical scalpel is often used. However, in the use of the electrical scalpel there are some problems that are difficult to solve, such as the generation of a large amount of surgical smoke during the treatment. In this study, we focused on development of microwave energy devices which can be used in the robotic surgeries. As a result of study, a tiny microwave antenna that generates localized heating region could be realized.

研究分野：電磁波工学

キーワード：マイクロ波 エネルギーデバイス ロボット手術 加熱領域

1. 研究開始当初の背景

今日の外科手術では、従来の開腹手術のみならず、腹腔鏡手術や内視鏡的手術、さらには、手術ロボットによる高精細手術（以下、ロボット手術）といった低侵襲（体に孔を開ける、切開するといった処置を最小限に抑えること）な手技が広く行われ、患者の QOL（quality of life：生活の質）が飛躍的に向上している。これらの手術では、生体組織の切開や止血を同時に行うことができるエネルギーデバイスが多用されており、この代表格が電気メスである。ところが、電気メスによる処置時にはサージカルスモークと呼ばれる大量の煙が生じ、低侵襲手術の遂行を妨害することがある。また、これに加えて、安全性の面でも原理的に解決し難い問題がある。そこで本研究では、使用時に煙を発生させずクリーンな処置を実現でき、かつ、安全性が高いマイクロ波による外科処置デバイスに着目した。

ところで、ロボット手術は、低侵襲手術の一形態として、近年、その適用範囲が拡大している。そして、ロボット手術におけるエネルギーデバイスは、高周波電流をエネルギー源とする電気メス装置と同一の原理のものが一般に用いられている。上述のように、電気メス装置では使用時に大量のサージカルスモークが発生し、ロボット手術の特長である高精細な手術の進行を阻む恐れがある。そこで、クリーンな処置を実現できるマイクロ波エネルギーをロボット手術に適用できれば、この問題を解決できると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、ロボット手術に対応できるような微細なマイクロ波エネルギーデバイスを開発する。手術中に体内に挿入されるロボットアームのサイズを考慮すれば、このデバイスの中で、生体組織に作用させる部分のサイズは、数 mm 角程度でなければならない。さらに、デバイスの物理的なサイズが小さいだけでなく、マイクロ波エネルギーの照射により生体に発生させる組織凝固領域のサイズもデバイスサイズと同等、すなわち、数 mm 角程度である必要がある。マイクロ波エネルギーデバイスの核心部分はマイクロ波アンテナであり、効率的なエネルギー放射を考えると、そのサイズはマイクロ波の波長と関係するため、単に小形のデバイスを開発すればよいというものではない。そこで本研究では、小形かつ微小領域のみに効率的にマイクロ波エネルギーを照射可能なデバイスの開発を目的とする。

3. 研究の方法

まず、生体組織の微小領域のみにマイクロ波エネルギーを照射することができるデバイスの基本構造、すなわち、マイクロ波アンテナ素子の構造を決定する。既存のエネルギーデバイスには、組織の切開用・凝固（止血）用・吻合用といった種類が揃っている。本研究では、その中でもマイクロ波が最も得意とする凝固（止血）用デバイスの開発を目標とする。ちなみに、組織凝固が実現できれば、吻合は比較的容易であり、また、切開は凝固後の組織を“刃”で切断することにより、非観血的に実現できる。

上記のアンテナ開発を行うために数値電磁界解析を活用し、さらに、この解析結果に基づいてデバイスを試作し、それを生体等価ファントムや摘出臓器に作用させることで特性を確認する。そして何らかの問題点が見出された際には、それを改善すべくアンテナ設計に反映し、実用的なデバイス開発につなげる。

4. 研究成果

物理的に小形であり、かつ、微小な組織凝固領域を発生させるマイクロ波アンテナ素子として、

図1に示す2重ループ状アンテナを考案した。このアンテナは、給電線路であるセミリジッド同軸ケーブルの先端部の外部導体のみを取り除き、誘電体および中心導体で2重のループを構成したものである。さらに、このループ上における電流が最大になるように、そこから延びる“ロッド”長を調整した。図2は、2重ループ状アンテナを生体組織に接触させ、さらにロッド長を変更した際の生体組織表面でのSAR (specific absorption rate [W/kg]) 分布の数値計算結果である。これらの結果より、ロッド長が10 mmの時にループ全面で均一にSARが上昇することがわかった。さらに図3は、試作した2重ループ状アンテナを試作した鉗子形状治具に装備して生体組織を焼灼した結果であり、市販のマイクロ波エネルギーデバイスによる焼灼と比較した。ここで、拡大率とは、アンテナ実寸と生体組織上の焼灼領域サイズの比率であり、この数値が大きいほどデバイスからはみ出た部分が焼灼されていると言える。この拡大率は、2重ループ状アンテナの方が市販のデバイスよりも小さいので、前者の方が把持した部分のみを確実に加熱できると考えられる。一方、図4は、各ロッド長の2重ループ上電流値の数値計算結果である。これより、ロッド長が10 mmの時に、やはりループ上の電流が大きくなることがわかった。

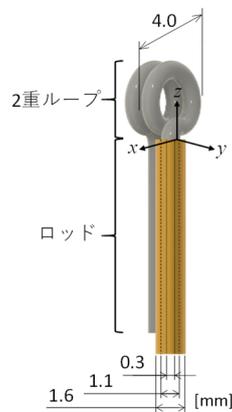


図1 2重ループ状アンテナ

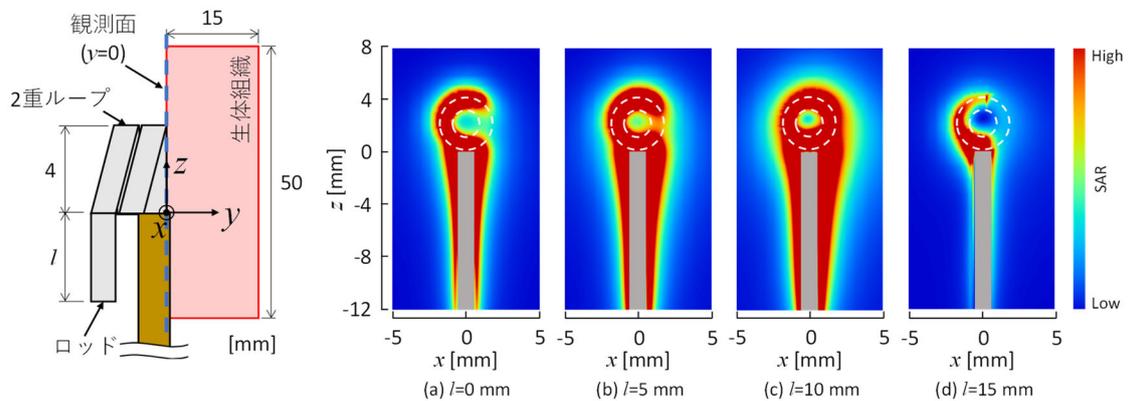


図2 2重ループ状アンテナが生体組織表面に発生させるSAR分布(計算結果)

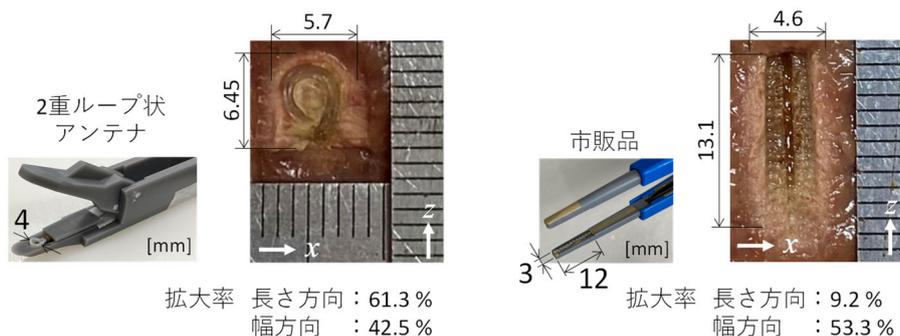


図3 試作した2重ループ状アンテナによる生体組織の焼灼

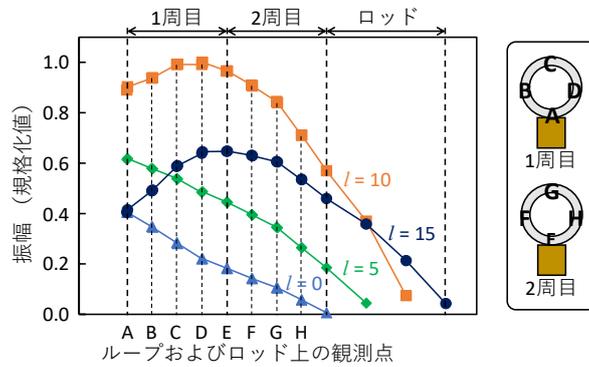


図4 2重ループ上の電流分布 (計算結果)

このように2重ループ状アンテナ近傍の SAR 分布は幅方向には十分に限局されており、それは図3の拡大率からも明らかである。しかしながら図2に示す SAR 分布によれば、長さ方向の加熱領域は長く、アンテナ素子部分のみに限局されていない。そこで本研究では、長さ方向の焼灼領域もデバイス部分のみに限局できるような構造を探索した。その結果、図5に示す微小なアンテナ素子に細径のスリーブを装荷することで、局所的な加熱を実現できた。図6は、このアンテナ素子周辺の SAR 分布計算結果と生体組織の焼灼結果である。2重ループ状アンテナにおいては、長さ方向に長い焼灼領域が得られるのに対して、このスリーブ付きアンテナは幅方向・長さ方向ともに限局した焼灼領域が得られた。今後は、図5に示すスリーブ付きアンテナの構造を簡略化することができれば、実用に際して有用であると考ええる。

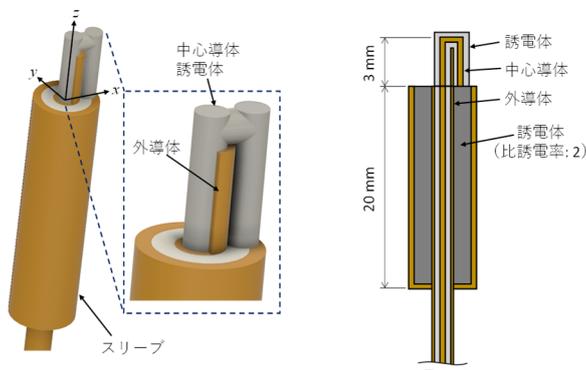


図5 スリーブ付きアンテナ

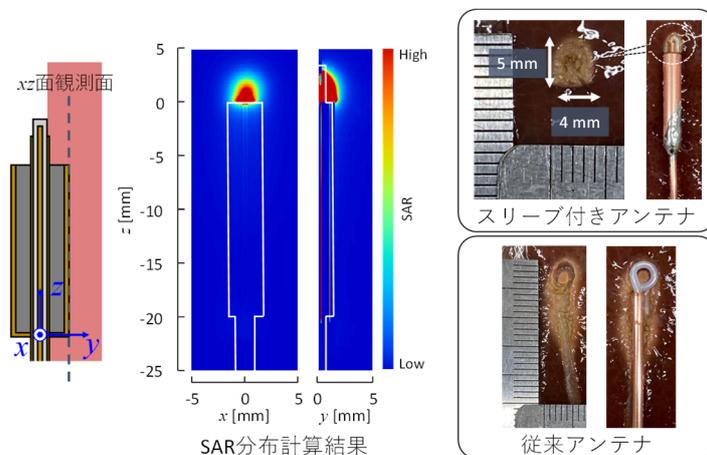


図6 スリーブ付きアンテナ周辺の SAR 分布および生体組織の焼灼

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 齊藤一幸	4. 巻 46
2. 論文標題 マイクロ波エネルギーデバイスの開発 - ロボット手術への適用を目指して -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Medical Science Digest	6. 最初と最後の頁 37-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 齊藤一幸	4. 巻 35
2. 論文標題 マイクロ波エネルギーデバイスの開発とその高度化 - ロボット手術への適用を目指して -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bio Clinica	6. 最初と最後の頁 66-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Aditya Rakhmadi and Kazuyuki Saito	4. 巻 9
2. 論文標題 Development of 500 kHz muscle equivalent solid phantom	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 519-523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Aditya Rakhmadi, Kazuyuki Saito, Shohei Matsuhara, Tomoyuki Tajima, and Nobuyoshi Takeshita	4. 巻 -
2. 論文標題 Comparison of radio frequency current and microwave energy for transcatheter renal denervation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JERM.2020.2972767	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西館 嗣海, 齊藤 一幸	4. 巻 J105-C
2. 論文標題 微小な加熱領域を発生させるマイクロ波エネルギーデバイスの開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 278 ~ 284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transelej.2022JC10005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsumumi Nishidate, Kazuyuki Saito	4. 巻 19
2. 論文標題 Characteristics of an antenna generating a localized heating region for robotic surgery	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.19.20220237	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 齊藤一幸
2. 発表標題 電磁波技術の医療応用
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤一幸, 西館嗣海
2. 発表標題 ロボット手術への適用を目指したマイクロ波エネルギーデバイスの開発
3. 学会等名 日本ハイパーサーミア学会第38回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tsugumi Nishidate and Kazuyuki Saito
2. 発表標題 Minimise longitudinal heating region of microwave energy device for robotic surgery
3. 学会等名 The 13th International Congress of Hyperthermic Oncology
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西館嗣海, 齊藤一幸
2. 発表標題 ロボット手術に適用可能な微小マイクロ波エネルギーデバイスの開発
3. 学会等名 2021年電子情報通信学エレクトロニクスソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西館嗣海, 齊藤一幸
2. 発表標題 局所過熱を目的としたマイクロ波エネルギーデバイスの特性解析
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuyuki Saito
2. 発表標題 Precise temperature calculations of biological tissue during microwave heating
3. 学会等名 2020 IEEE 9th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齊藤一幸, アディチャ ラクマディ
2. 発表標題 アブレーションデバイスの性能評価用の2.45 GHz 透明筋肉ファントム
3. 学会等名 日本ハイパーサーミア学会第37回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Aditya Rakhmadi and Kazuyuki Saito
2. 発表標題 Development of miniature microwave energy device for robotic surgery operation
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井川大誌, 齊藤一幸
2. 発表標題 ロボット手術用マイクロ波エネルギーデバイス - 微小デバイスの開発とその特性評価 -
3. 学会等名 第39回Microwave Surgery研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Aditya Rakhmadi and Kazuyuki Saito
2. 発表標題 Machine learning temperature prediction for microwave heating
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shohei Matsuhara, Kazuyuki Saito, Tomoyuki Tajima, and Nobuyoshi Takeshita
2. 発表標題 Development of microwave denervation catheter and its performance evaluation method
3. 学会等名 The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and European Bioelectromagnetics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuyuki Saito and Ryo Manago
2. 発表標題 Numerical calculation of biological tissue coagulated region generated by microwave surgical device
3. 学会等名 The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and European Bioelectromagnetics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuyuki Saito and Masashi Sugiyama
2. 発表標題 Performance evaluations of microwave snare
3. 学会等名 2019 IEEE Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Aditya Rakhmadi and Kazuyuki Saito
2. 発表標題 Comparison study of transcatheter renal denervation using radio frequency current and microwave energy
3. 学会等名 日本ハイパーサーミア学会第36回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuyuki Saito and Masashi Sugiyama
2. 発表標題 Development and performance evaluations of microwave snare
3. 学会等名 2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Aditya Rakhmadi and Kazuyuki Saito
2. 発表標題 Comparison of radio frequency current and microwave energy for transcatheter renal denervation
3. 学会等名 2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuyuki Saito
2. 発表標題 Improvement of numerical calculations for heating performances of microwave therapeutic devices
3. 学会等名 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Aditya Rakhmadi and Kazuyuki Saito
2. 発表標題 Comparison study of transcatheter renal denervation using radio frequency current and microwave energy
3. 学会等名 2019 International Symposium on InfoComm and Mechatronics Technology for Bio-Medical and Helthcare Application (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松原翔平, 齊藤一幸, 田島知幸, 竹下修由
2. 発表標題 マイクロ波除神経カテーテルの開発と評価
3. 学会等名 第12回医用生体電磁気学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsugumi Nishidate and Kazuyuki Saito
2. 発表標題 Development of microwave energy devices for application to robotic surgery
3. 学会等名 The 1st Annual Meeting of BioEM (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsugumi Nishidate and Kazuyuki Saito
2. 発表標題 Small loop shape antenna for generating a localized heating region
3. 学会等名 2022 International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西舘嗣海, 齊藤一幸
2. 発表標題 局所加熱可能なマイクロ波エネルギーデバイスの開発 - 後方加熱の抑制 -
3. 学会等名 第24回関東ハイパーサーミア研究会・全身ハイパーサーミア研究会 合同学術研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------