

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	超音波凝固切開装置の柔軟化を目指したより線の振動・発熱特性の解析および評価に関する研究 (Analysis and Evaluation of Thermal-Vibrational Characteristics of Stranded Wires for Enhancing the Flexibility of Ultrasonic Coagulation and Incision Devices)
氏 名 (Name)	川角 祐貴子
日本の外科手術では患者への侵襲を最小限に抑える低侵襲手術が広く普及しており，その臨床的有用性は高く評価されている．低侵襲手術は，従来の開腹手術に比べて術後の回復期間が短く，痛みや合併症のリスクが低減できるため，患者にとって身体的負担が少ないという利点を有する．また，医療現場においても，入院期間の短縮や手術効率の向上といった観点から，低侵襲手術は医療経済的な利点も備えている．このような背景から，低侵襲手術は現代外科において中心的な役割を果たしており，特に内視鏡手術はその代表例として注目される．内視鏡手術では，体内に細径の器具を挿入し，がんやポリープなどの悪性腫瘍を除去する．特に軟性鏡を用いた手術では，体内の複雑な解剖学的構造に対応する柔軟性を持ちながら，操作性や視野確保といった性能も満たす必要がある．このため，柔軟なかつ高精度な操作が可能な手術器具の開発が求められている．特に，腫瘍に輪を掛けて焼き切る内視鏡的粘膜切除術（EMR）やポリペクトミに用いられるスネアは，より線構造により高い柔軟性を有している．従来，これらの柔軟なスネアは電気を通すことで腫瘍部を焼き切る方式が採用されてきた．しかし，高温により効果を発揮するため，患部以外の組織に熱や電気が伝わり，組織損傷のリスクがある，煙の発生により視界が悪くなり，手術操作に支障をきたすなどの課題がある．このため，柔軟性を維持しつつ，安全かつ効率的に腫瘍切除を行うことのできる手術器具の開発は，喫緊の課題である．近年，超音波凝固切開装置が内視鏡手術における新たな手段として注目されている．超音波凝固切開装置は，高周波電気スネアに比べ低温で組織凝固を行えるため，正常組織への影響が少なく，手術中の煙の発生も抑制できるという利点を持つ．また，超音波は機械的振動エネルギーにより組織を凝固・切開するため，電気を直接体内に流す必要がなく，安全性の向上が期待できる．しかし，超音波振動は機械的な振動現象であり，柔軟化により振動エネルギーが低下するため超音波振動で凝固切開効果を発揮する柔軟な手術器具は実現していない．一方で，所属研究室では，超音波凝固切開装置の細径化を目指し，機械振動特性を用いた高出力化が研究されている．しかし，従来の単線構造では，十分な超音波エネルギーを伝播するための断面積を確保すると，人体の複雑な形状十分追従できず，変形が限定的となるため，柔軟性の向上には課題が残されている．この背景から，本研究では，単線に比べて同等の断面積でより高い柔軟性を有するより線ワイヤに超音波振動を伝達させ，摩擦による発熱を利用して腫瘍を焼き切る新規な超音波手術器具の開発を目指すこととした． そこで，実験において確認されたより線への超音波振動伝達時に生じるワイヤ途中での発熱を主な課題として取り上げた．本実験の結果は，より線でも超音波振動の伝播が可能な証拠である一方で，周囲のデバイスを損傷する危険があり，その抑制が必要であることが明らかとなった．発熱の原因を明らかにするため，有限要素法を用いた摩擦発熱シミュレーションモデルを構築し実施した．そ	

様式7号（第12条，第31条関係）

（様式7号）（Format No.7）日本語版

の結果，発熱の主な原因は素線間の摩擦であり，特に芯線と側線，および側線同士の接触によって摩擦発熱が発生することが示唆された．これらの結果を踏まえ，シミュレーションで得られた発熱傾向および挙動を実験結果と照合することを目的として，より線付きの超音波ホーンを試作し，振動観察および発熱計測方法を考案した．また，凝固に必要な発熱温度や振動振幅について考察した．本論文は1～5章で構成される．第1章では研究背景及び本研究の目的，超音波伝播より線の柔軟化への課題を説明した．特に，従来の超音波伝播機構を有する金属ホーンの剛性に起因する課題に着目し，より線構造を導入することで柔軟性を高める可能性を述べるとともに，関連研究との比較について説明した．第2章では，より線構造における超音波伝播時の課題を抽出することを目的として，構造—接触—伝熱連成解析モデルを構築した．解析の結果，素線間の摩擦に起因する局所的な発熱現象が確認され，構造形状および加振周波数の条件を変化させることで，発熱分布および振幅伝播特性に顕著な変化が生じることを明らかにした．第3章では，超音波メスによる血管変性に必要な出力を見積もることを目的に，逆位相の複合振動を付与したデバイスを用いて，血管内膜の加熱中の温度分布およびタンパク質変性領域の可視化・定量評価を行った．押付加重，加熱時間，水分量を変化させて実験を行い，変色輪郭部の積算温度を算出した結果，平均 $4310 \pm 14.53 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}$ で血管凝固が可能であることを示した．第4章では，市販の超音波メスのアクチュエータと接続可能なより線試作デバイスを製作し，実験および解析により各構成素線の振動モードを評価した．その結果，側線の振動モードが発熱に関係があることが示唆され，実際の血管を用いた試験において発熱および変性を確認した．第5章ではこれまでの解析および実験結果をまとめ，本研究で得られた知見をまとめるとともに，今後の課題及び展望について述べた．

（和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度）
（about 800 words）

学 位 論 文 要 旨	
(Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	超音波凝固切開装置の柔軟化を目指したより線の振動・発熱特性の解析および評価に関する研究 (Analysis and Evaluation of Thermal-Vibrational Characteristics of Stranded Wires for Enhancing the Flexibility of Ultrasonic Coagulation and Incision Devices)
氏 名 (Name)	KAWASUMI Yukiko
Minimally invasive surgery has been widely adopted in Japanese surgical practice, and its clinical usefulness has been highly evaluated. Compared with conventional open surgery, minimally invasive surgery offers several advantages, including a shorter postoperative recovery period, reduced pain, and a lower risk of complications, thereby reducing the physical burden on patients. In addition, from the perspective of clinical practice and medical economics, minimally invasive surgery contributes to a reduction in hospital stay and an improvement in surgical efficiency. For these reasons, minimally invasive surgery plays a central role in modern surgery, and endoscopic surgery has attracted considerable attention as a representative modality. In endoscopic surgery, slender instruments are inserted into the human body to remove malignant lesions such as tumors and polyps. Procedures using a flexible endoscope require not only sufficient flexibility to navigate complex anatomical structures but also adequate operability and a stable visual field. Consequently, there is a strong demand for surgical instruments that can achieve both high flexibility and high-precision manipulation. Among such instruments, snares used in endoscopic mucosal resection (EMR) and polypectomy typically employ a stranded-wire structure, which provides higher flexibility than a single-wire structure. Conventionally, these flexible snares have adopted an electrosurgical method, in which electrical current is applied to excise lesions through thermal effects. However, because electrosurgical snares rely on high temperatures to achieve tissue cutting and coagulation, thermal or electrical energy may be transmitted to surrounding healthy tissues, increasing the risk of unintended tissue damage. Furthermore, the generation of surgical smoke during cauterization degrades endoscopic visibility, which may interfere with surgical manipulation. These limitations indicate that the development of surgical instruments capable of maintaining flexibility while enabling safe and efficient tumor resection is an urgent issue. In recent years, ultrasonic coagulation and cutting devices have attracted attention as a novel approach in endoscopic surgery. Compared with high-frequency electrosurgical snares, ultrasonic devices enable tissue coagulation at lower temperatures, thereby reducing thermal damage to normal tissues and suppressing the generation of intraoperative smoke. Moreover, because ultrasonic devices utilize mechanical vibration energy rather than directly transmitting electrical current through the patient's body, they are expected to offer improved safety. However, ultrasonic vibration is inherently a mechanical vibration phenomenon, and its energy transmission efficiency decreases as instrument flexibility increases. As a result, flexible ultrasonic surgical instruments capable of achieving sufficient coagulation and cutting performance have not yet been realized. In our laboratory, research has been conducted to miniaturize ultrasonic coagulation and cutting devices while enhancing their output by exploiting mechanical vibration characteristics. Nevertheless, in conventional single-wire structures, securing a sufficient cross-sectional area to transmit adequate ultrasonic energy limits the ability of the instrument to follow complex anatomical shapes,	

thereby restricting deformation and flexibility. Consequently, further improvement in flexibility remains a challenge.

Against this background, the present study aims to develop a novel ultrasonic surgical instrument that transmits ultrasonic vibration through a stranded-wire structure, which exhibits higher flexibility than a single wire with an equivalent cross-sectional area. In this approach, ultrasonic vibration is transmitted through the stranded wire, and frictional heat generated between individual filaments is utilized to coagulate and cut tumor tissue.

As a primary issue, experiments revealed unintended heat generation along the length of the stranded wire during ultrasonic vibration transmission. While this result provides evidence that ultrasonic vibration can propagate through a stranded wire, the associated heat generation poses a risk of damage to surrounding devices, indicating that suppression of this phenomenon is necessary. To clarify the mechanism of heat generation, a frictional heat generation simulation model based on the finite element method was constructed and implemented. The simulation results suggested that the primary cause of heat generation is friction between individual filaments, particularly at the contact interfaces between the core wire and the side wires, as well as between adjacent side wires.

Based on these findings, an ultrasonic horn equipped with a stranded wire was fabricated to experimentally validate the simulation results. Methods for vibration observation and temperature measurement were established, and the experimental results were compared with the simulated heat generation trends and behaviors. In addition, the temperature and vibration amplitude required for effective tissue coagulation were discussed.

This dissertation consists of five chapters. Chapter 1 describes the research background, the objectives of the study, and the challenges associated with enhancing flexibility in ultrasonic vibration transmission. Particular attention is given to the limitations arising from the rigidity of conventional metallic ultrasonic horns, and the potential of introducing a stranded-wire structure to improve flexibility is discussed in comparison with related studies. Chapter 2 presents a coupled structural–contact–thermal analysis model developed to identify issues in ultrasonic transmission through stranded wires. The analysis confirms localized friction-induced heat generation and demonstrates that variations in structural geometry and excitation frequency significantly affect heat distribution and vibration propagation characteristics. Chapter 3 estimates the output required for vascular coagulation using ultrasonic devices by applying composite vibrations with inverse phases, and evaluates temperature distributions and protein denaturation regions in vascular tissue. The results indicate that vascular coagulation is achievable at an average cumulative temperature of 4310 ± 14.53 °C·s. Chapter 4 describes the fabrication of a prototype stranded-wire device compatible with a commercial ultrasonic scalpel actuator and evaluates the vibration modes of individual filaments through experiments and simulations, revealing a relationship between the vibration mode of side wires and heat generation. Finally, Chapter 5 summarizes the findings of this study and discusses future challenges and perspectives.

(様式 9 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	川角 祐貴子
審 査 委 員	主 査： 森田 実
	副 査： 大木 順司
	副 査： 藤井 文武
	副 査： 森 浩二
	副 査： 中原 佐
論 文 題 目	超音波凝固切開装置の柔軟化を目指したより線の振動・発熱特性の解析および評価に関する研究(Analysis and Evaluation of Thermal-Vibrational Characteristics of Stranded Wires for Enhancing the Flexibility of Ultrasonic Coagulation and Incision Devices)
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 本論文は、低侵襲手術において広く用いられている内視鏡手術器具に着目し、柔軟性と安全性を両立した超音波スネア型手術器具の実現を目的として研究を行ったものである。低侵襲手術は、患者への身体的負担が少なく、術後回復の早期化や医療経済的観点からも有用性が高い手法であり、現代外科において大きな役割を担っている。特に内視鏡手術では、体内の複雑な解剖学的構造に対応可能な柔軟性を持つ手術器具の開発が求められている。内視鏡的粘膜切除術（EMR）やポリペクトミに用いられるスネアは、より線構造により高い柔軟性を有する一方、従来は高周波電流を用いた切除方式が主流であり、高温による組織損傷や煙の発生による視野不良といった課題が指摘されてきた。近年、超音波凝固切開装置は、低温での組織凝固が可能で安全性に優れる点から注目されているが、超音波振動は柔軟化により伝播が困難となるため、柔軟な超音波手術器具の実現には至っていない。本論文は、これらの課題に対し、単線に比べて同等の断面積で高い柔軟性を有するより線ワイヤに超音波振動を伝達し、素線間摩擦による発熱を利用した新規超音波手術器具の可能性を示した研究である。本研究ではまず、より線への超音波振動伝達時に観察された伝播部での発熱現象に着目し、その発生要因を明らかにするため、有限要素法を用いた構造―接触―伝熱連成解析モデルを構築している。その結果、発熱の主要因が素線間の摩擦、特に芯線と側線、および側線同士の接触による摩擦発熱であることを明らかにしており、より線構造における発熱メカニズムを理論的に示している。さらに、シミュレーション結果の妥当性を検証するため、より線付き超音波ホーンを試作し、振動観察および発熱計測を行っている。また、血管凝固に必要な発熱条件を明らかにすることを目的として、血管内膜の加熱実験を実施している。押付荷重、加熱時間、水分量を変化させた実験により、変色領域を積算温度として定量化し、平均 $4310 \pm 14.53 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}$ において血管凝固が可能であることを示しており、凝固成立条件を定量的に評価した。また、市販の超音波メスのアクチュエータと接続可能なより線試作デ	

バイスを製作し、実験および解析により各構成素線の振動モードを評価している。その結果、側線の振動モードが発熱と関係することが示唆され、実際の血管を用いた試験においても発熱および組織変性を確認しており、提案手法の実現可能性を実証している。以上のように、本論文は解析、基礎実験、試作および実試料評価を通じて一貫した検討を行っており、柔軟性と超音波伝播性能の両立という困難な課題に対して、新たな視点から解決策を提示している。

公聴会での主な質問内容は、発熱温度および発熱位置の制御方法に関する将来展望、振動および発熱メカニズムの妥当性、臨床応用の可能性についてなど活発な議論が行われた。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計 4 編 参考論文 計 2 編)

- 1) Yukiko KAWASUMI, Shunsuke MORIKAWA, Zhongwei JIANG, Minoru MORITA, Development of Thermal Mapping System for Evaluating Protein Denaturation by Opposite-Phase Ultrasonic Scalpel, International Journal of Engineering Innovation and Management, Volume15, Issue2, Page 9-18, 2025
- 2) Yukiko Kawasumi, Minoru Morita, Zhongwei Jiang, Research on analytical models for reducing friction heat for flexible ultrasonic propagation using stranded wire, Microsystem Technologies, Volume30, Page 1393-1401, 2024
- 3) Yukiko Kawasumi, Minoru Morita and Zhongwei Jiang, RESEARCH ON REDUCING FRICTION HEAT FOR FLEXIBLE ULTRASONIC PROPAGATION STRANDED WIRE, 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022), Manuscript ID: D3-1-02, pp.1-3, 2022
- 4) Yukiko Kawasumi, Minoru Morita, Hideki Furukawa, Zhongwei Jiang, Measurement of Frictional Heat and Vibration Modes for Ultrasonic Propagation Using Medical Flexible Stranded Wire, International Conference on Innovative Application Research and Education (ICIARE2024), Vol.2024, pp.33-37, 2024