

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：51303

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20238

研究課題名（和文）キーデバイスに単一材料を用いた自走型内視鏡の研究開発

研究課題名（英文）Research and Development of Self-Propelled Endoscope using Single Material for Key Device

研究代表者

鈴木 順（Suzuki, Jun）

仙台高等専門学校・総合工学科・准教授

研究者番号：00639255

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では腫瘍の見落とし防止や治療を考慮しカプセル内視鏡の自走化のために最適なアクチュエータ機構と動力源となる素子の材料パラメータの検討を行い、環境に優しい酸化亜鉛（ZnO）材料に関して成膜条件の最適化やZnOナノワイヤーの成長方法について検討した。その結果、ナノワイヤーの成長で結晶化に関する反応促進方法に関して課題を抽出できた。また、消化管内で留まることができるバルーン型および移動できるひれ型のアクチュエータの試作を行い、評価系の構築ができ、改善点の提案ができた。腫瘍を捉える撮像素子の画素サイズと画素数の検討では画像認識方法について検討を行い、腫瘍の検出精度向上の方法について検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

消化管内のような柔らかく湿った悪環境下で自走する能動的なカプセル内視鏡を実現するために新しい機構のアクチュエータを研究開発することは学術的意義がある。また、アクチュエータや光源の材料を地球環境や人体に優しい材料である酸化亜鉛（ZnO）の単一材料を使用する点に関しては工程削減の観点から社会的意義が大きい。本研究では超小型の動力源を半導体プロセスと機械加工を一緒に使いながら作製する工程を確立する点、ZnO材料を使用しその膜やナノワイヤーの特性を生かし、素子を作る点に関して独創性と独自性がある。また、ロボットをより小型化、最小化させるアプローチに関しての製作・評価技術を進めた社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the optimum actuator mechanism and material parameters of the power source element for self-propulsion of the capsule endoscope, considering the prevention of missed tumors and treatment, and we investigated the optimization of film formation conditions and the growth method of ZnO nanowires using environmentally friendly zinc oxide (ZnO) material. As a result, we were able to extract issues related to the reaction acceleration method for crystallization in the growth of nanowires. In addition, prototypes of a balloon-type actuator that can stay in the digestive tract and a fin-type actuator that can move were made, an evaluation system was constructed, and suggestions for improvement were made. In the study of the pixel size and the number of pixels of the image sensor that captures tumors, the image recognition method was examined, and a method to improve the detection accuracy of tumors was discussed.

研究分野：ものづくり技術（機械・電気電子・化学工学）

キーワード：カプセル内視鏡 酸化亜鉛 圧電素子 ナノワイヤー アクチュエータ 画像認識 発光・受光材料

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

カプセル内視鏡は、腸の蠕動運動で受動的に移動し、胃腸内を観察することは可能であるが、能動的に移動し、腫瘍の見落を防ぎ、治療まで行うカプセル内視鏡はまだ実用化に至っていない。また、紫外光を利用した内視鏡は高解像度な画像が取得でき有用である[1]にも変わらず、カプセル内視鏡としての実施例はない。本研究は、温度、湿度、胃液や腸液等の粘性が高い液体、便等の固形物が混在している消化管内という過酷な環境下で自走するためのアクチュエータの機構の最適化とキーデバイスに単一材料を使うことにある。また、生体内に入って使い捨ての装置になるため、生体内で万が一暴露した場合に人体の影響が少なくすること、安価な材料を使うことが求められる。本研究では課題克服のため、生体内でも能動的に移動できる医療機器を想定し研究開発を行ってきた。本研究では自走できる能動的なカプセル内視鏡の実現のため、動力の原材料、発光材料、受光材料に用いることができ、環境に優しく、安価である酸化亜鉛 (ZnO) 材料を主要なデバイスを構成する材料として採用した。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は今まで異なる材料から構成されていたアクチュエータ、発光素子、受光素子の作製に対し、生体適合性が高く、プロセス時に有害なガスを使用しない、低温成膜可能であり、環境に優しく安価な、単一の ZnO 材料を使用し、経口型のアクティブな内視鏡を開発することである。また、学術的独自性と創造性はキーデバイスの構成材料に単一材料を使用し材料特性の共有化を図りつつ、胃や腸などの悪環境下でも自走可能なアクチュエータと広範囲の視野を撮影できる撮像システムを研究開発することにある。

単一材料に ZnO 材料を選択した理由は、電気エネルギーを機械エネルギーにどれくらい変換できるかを示す電気機械結合係数が高く、アクチュエータへの応用も期待でき[2][3]、他の材料と比べ、低温成膜可能でプラスチック材料等の耐熱性が低い基板への成膜が可能である点、そして、禁制帯幅 3.3 eV の直接遷移型半導体であり、紫外の波長域 (約 380 nm) の光学特性を有するため、従来のカプセル内視鏡で使用される可視光の波長よりも短く、より高い分解能で像を捉えられるからである[1]。また、電気特性や光学特性の低下を抑制しながら ZnO 材料の低温成膜が可能となれば、透明プラスチックカプセルにアクチュエータを作り込むことができる。発光素子または受光素子とアクチュエータを同一基板に実装し動作させれば、発光ダイオードやイメージセンサを多数使用せずに広い視野を照らし撮像できる可能性がある。紫外光を発する代表的な半導体材料として GaN があるが、GaN の LED はレアメタルである In や毒性のある As を使用しており、生体内で使用するデバイスとしては不向きである。その他、アクチュエータに注目すると、胃や腸内など柔らかく湿った悪環境下で管路内を自走するカプセル内視鏡の事例が少ないため[4]、本研究を通して生体内の悪環境下で能動的に移動する新しいアクチュエータの知見を見出すことができることは学術的に独自性や創造性の面で大きな意味を持つ。

### 3. 研究の方法

本研究では単一の ZnO 材料を用いて消化管内の悪環境下でも能動的に移動できるカプセル内視鏡を研究開発すること、発光素子、受光素子を製作し、アクチュエータと同期させた撮像システムを構築することを目的としている。本研究で遂行予定の項目に対する具体的なビジョンを以下に示す。

#### (1) 最適なアクチュエータの機構と材料パラメータの最適化 (線虫型、バルーン型等)

ZnO の材料特性を把握した上で、膜の応力等の機械的特性、静電容量、電気特性を評価する評価サンプルを製作し、アクチュエータ、発光素子、受光素子に関するパラメータの抽出を行う。アクチュエータに関わる圧電特性に関しては片持ち梁状のサンプルを作製し、電圧と変位の関係を確認する。そのデータを基に、アクチュエータの方式を決定する。アクチュエータの種類例として、線虫型、バルーン型、水かき・尾びれ型などを検討する。

#### (2) 画素サイズと画素数の最適化

発光素子に関しては、ZnO ナノワイヤーを用いて、その電圧の印加方法や発光強度等の測定手法について検討し特性評価する。受光素子については画素サイズを変えながら画素サイズと受光感度の関係を確認し、画素サイズを小さくしていく。最終的には、アクチュエータの動作角度と特性評価で得られた受光感度の情報を基に視野角や空間分解能を考慮した画素サイズや画素数についてパラメータを最適化する。

#### (3) ロボットの動きと同期した撮像システムの最適化

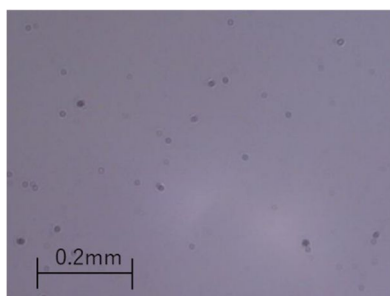
生体内を模倣し胃腸モデルについて 3 次元プリンタ等を活用した形状モデルの作製と粘液、温度、湿度等の悪環境を見立てた動作環境を構築する。その上で、モデル内の見落としを防止するためのロボットの動きと同期した撮像システムの構築を行う。サイズの目標値は従来のカプセル内視鏡 (ギブン・イメージング株式会社製 PillCam) の直径 11 mm、長さ 26 mm より小さいサイズを目指した。

#### 4. 研究成果

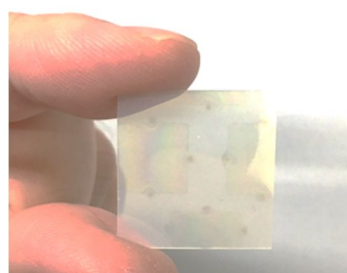
上記3.の研究の方法に基づいて研究を遂行したときの成果について以下に示す.

(1)最適なアクチュエータの機構と材料パラメータの最適化(線虫型,バルーン型等)

はじめに ZnO の材料特性を知るために,諸特性を測定するためにスパッタでガラス基板上に ZnO 膜の成膜を行った(図1(a)).結晶性を示す X 線回折評価を行った結果,(002)面の c 軸に配向する膜ができることがわかった.また,カプセル内視鏡の筐体に成膜することも考えたプラスチック上への成膜も行い,プラスチック上への成膜が可能であることがわかった(図1(b)).続いて ZnO ナノワイヤーの工程である減圧 MOCVD での成長工程についてガラス基板上に ZnO ナノワイヤー成長プロセスを行った(図2).その結果,Zn アセチルアセトナートの昇華した材料が基板に付着した.X 線回折での確認の結果,ZnO の結晶配向がみられなかったため,ホットプレートでの 300 °Cでのアニールやバレルエッチャーによる反応促進を狙ったが,結晶化できなかったため,今後はナノワイヤー成長時の反応を促進させるように成長時に基板を加熱する方法やレーザーアニール等,ホットプレートでの 300 °Cでのアニールよりも高いエネルギーを成長する ZnO ナノワイヤー部に与える手段を検討しなければいけないことがわかった.

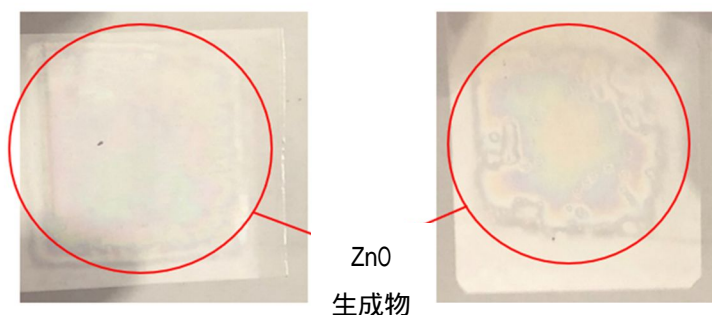


(a) ガラス基板上に成膜



(b) プラスチック基板上に成膜

図1 スパッタによる ZnO の成膜結果



(a) 窒素のみでの成長

(b) 酸素のみでの成長

図2 ZnO ナノワイヤー装置での成長結果

ZnO での素子プロセスを進めると同時に,カプセル内視鏡用のアクチュエータ機構の検討を行った.今回は図3に示すような ZnO で超音波モータを作製するという想定で2つのアクチュエータについて検討を行った.1つ目は停止機構としてバルーン型を検討し,2つ目はえら型アクチュエータの検討を行った.検討して試作したアクチュエータについて図4に示す.

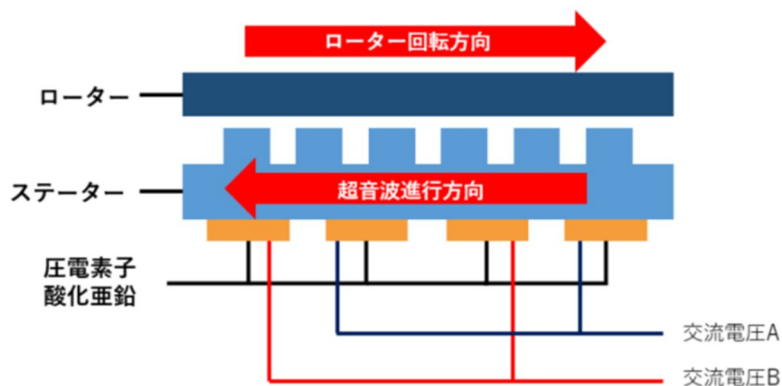
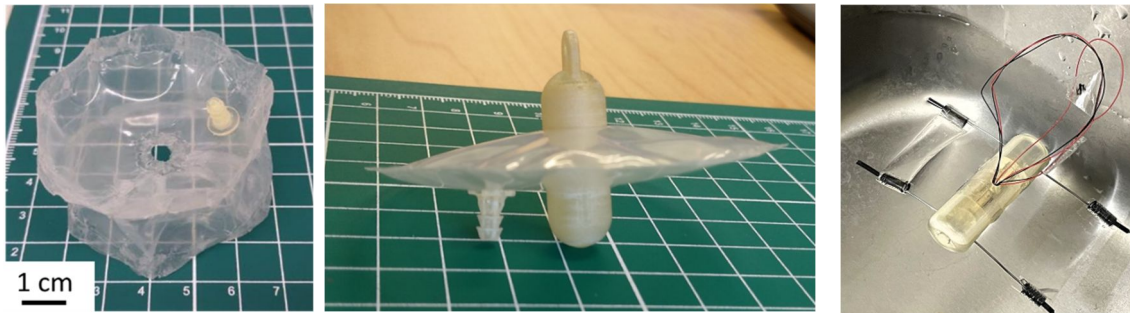


図3 ZnO 圧電素子を用いた超音波モータの原理図



( a ) バルーン型 ( 展開時 )      ( b ) バルーン型 ( 未展開時 )      ( c ) ひれ型

図 4 試作品写真

結果として、停止機構についてバルーン形状を検討し、バルーンの径サイズを大きくすることによって摩擦力が大きくなることがわかった。また、ひれ型については2つの駆動軸で動かした際にも水中で泳ぐ形になることはわかったが、腸壁などの上での動きについてはトルク不足で動作の確認まで至らなかった。今後はえら型のアクチュエータについてトルク不足の解消とともにえらの骨の形状や本数等の動作機構の最適化を行い、制御技術の確立をしていく予定である。また、自走にすることで必要なトルクアップのための電力不足を解決するため、ワイヤレス給電技術の検討も行い、その原理実験を行い、誘電体で囲まれたダイポールアンテナで物理的なアンテナ長を短くできる可能性が示唆でき、カプセル内視鏡内への実装の兆しがみえた。

### (2)画素サイズと画素数の最適化

発光素子・受光素子での検討として、プロセスが確立しなかったため、代用として市販のスマートフォン付属の LED 光源を用いて画像取得したものを使用し認識システムを構成した上で、腫瘍部の検出ができるか OpenCV 等の画像認識ソフトを用いてその手法について検討した。画像認識によって大腸モデルの腫瘍を検出した様子を図 5 に示す。この結果から光源の照射はハレーションや暗い部分を作らないようにし撮影することで腫瘍についての検出ができることがわかった。課題として、医療画像であるため、少ない教師画像のサンプル数で腫瘍を検出する方法についての確立とアクチュエータ制御のためのカプセル内視鏡と腫瘍までの距離を確認する手段について確立することが必要であることがわかった。

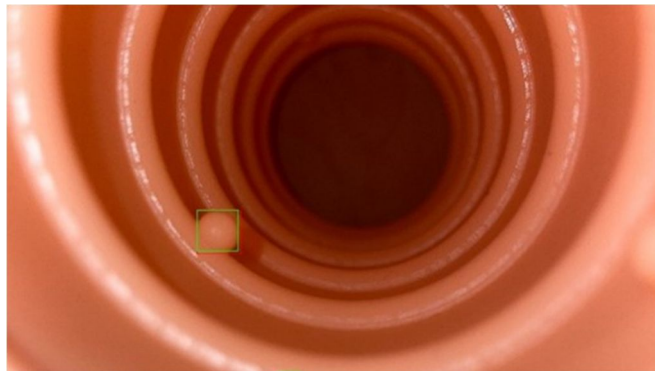
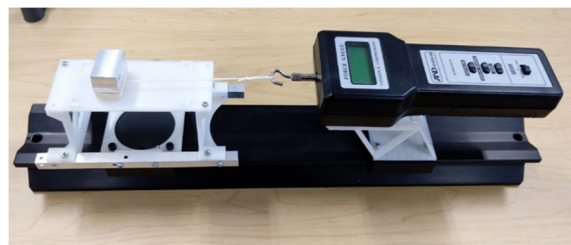
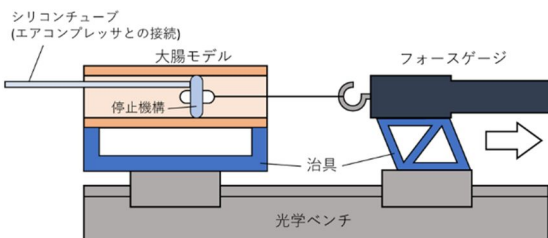


図 5 画像認識によって大腸モデルの腫瘍を検出した様子

### (3)ロボットの動きと同期した撮像システムの最適化

今回はアクチュエータが未完成であったが、アクチュエータ評価のための評価系について図 6 のような治具を作製した。今後はロボットの動きを検出するための自己位置推定システムの搭載と受発光素子の視野を変更できる機構の検討が必要となることがわかった。



( a ) 原理図

( b ) 試作した評価治具

図 6 大腸モデル摩擦特性測定環境

## 参考文献

- [ 1 ] 永尾重昭 . 各種光源による内視鏡の歴史と発展 . Gastroenterological Endoscopy . 2008 , Vol.50 (Suppl.3) . p 3436 - 3440 .
- [ 2 ] 中鉢憲賢 . ZnO 圧電膜とその応用 . 応用物理 . 1977 , 第 46 巻 , 第 7 号 , p663-676.
- [ 3 ] 本多電子株式会社 : 圧電薄膜 ZnO ( 酸化亜鉛 ) .  
<https://www.honda-el.co.jp/ceramics/ZnO.html> , 参照日 2024 年 6 月 2 日 .
- [ 4 ] 株式会社ミュー , “ 自走式カプセル内視鏡(ヒレ型) のヒトへの応用” , <http://www.mu-frontier.com/1106.html> , 閲覧日 : 2024 年 6 月 2 日 .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋優大, 鈴木順
2. 発表標題 自走式カプセル内視鏡への実装に向けた無線電力伝送システムの構築
3. 学会等名 2023年度 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木順, 今井裕司, 矢島邦昭
2. 発表標題 自走型カプセル内視鏡の要素技術開発
3. 学会等名 日本高専学会 第29回年会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋優大, 鈴木順
2. 発表標題 カプセル内視鏡 におけるワイヤレス給電のアンテナ形状に関する検討
3. 学会等名 2022年度 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川原田弘, 鈴木順, 今井裕司
2. 発表標題 消化管内でのバルーンを用いたカプセル内視鏡の停止機構の検討
3. 学会等名 2022年度 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋葉大輔, 佐々木匠, 鈴木順, 柏葉安宏
2. 発表標題 酸化亜鉛を用いた新しい圧電膜作製プロセスの検討
3. 学会等名 2022年度 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋優大, 鈴木順
2. 発表標題 自走式カプセル内視鏡への実装に向けた無線電力伝送システムの構築
3. 学会等名 令和 5年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システム・材料とその応用」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川原田弘, 鈴木順
2. 発表標題 バルーンを用いたカプセル内視鏡の停止機構の研究
3. 学会等名 令和 4年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システムとその応用」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋葉大輔, 佐々木匠, 鈴木順, 柏葉安宏
2. 発表標題 酸化亜鉛を用いた圧電素子の作製プロセスの検討
3. 学会等名 令和 4年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システムとその応用」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 真野高彰, 鈴木順
2. 発表標題 自由空間におけるアクチュエータ自動制御システムの開発
3. 学会等名 2021年度 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小井戸優斗, 鈴木順, 矢島邦昭
2. 発表標題 医療機器における画像認識システムの開発
3. 学会等名 2021年度 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 真野高彰, 鈴木順
2. 発表標題 自由空間における環境情報収集のためのアクチュエータ自動制御システムの開発
3. 学会等名 令和3年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システムとその応用」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小井戸優斗, 鈴木順
2. 発表標題 医療機器における画像認識システムの開発
3. 学会等名 令和3年東北地区若手研究者研究発表会「音・光・電波・エネルギー・システムとその応用」
4. 発表年 2021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
---------	---------