

論文の内容の要旨

論文題目 内視鏡下手術用視野可変内視鏡の視野変更方法に関する研究

氏名 金季利

[背景]

内視鏡下手術において、術者の観察したい部分を内視鏡で観察するための内視鏡の円滑な操作は非常に重要である。この円滑な操作を実現するために、術者自らの内視鏡操作が可能な内視鏡マニピュレータが開発されてきた。しかし、これらの内視鏡マニピュレータは、既存の内視鏡に駆動機能を付加したものであり、内視鏡本体の移動、屈曲等によって視野変更を行うため、視野方向の変更は可能であるが、内視鏡本体が臓器や周辺組織に侵襲を与える危険性があった。そこで、本研究では、上記の問題を解決し、安全な視野変更を実現するため、新たな視野変更方法を提案する。

[目的]

本研究では、内視鏡下手術において、従来の内視鏡の視覚情報の制限による術者の負担を軽減し、安全な内視鏡下手術を可能にするため、安全性、操作性、衛生性、応用性を備え、シンプルな構造、細径化に適した、新たな視野変更方法を提案し、視野可変内視鏡の開発を行う。

- ◆ ビームスプリッタを用いることで、1本の内視鏡で正面と側面の観察が可能な視野変更方法を提案する。
- ◆ ウェッジプリズムを用いた視野可変内視鏡の細径化を行い、胎児外科への応用性について検討を行う。
- ◆ 変形コーンミラを用いることで、内視鏡の正面と周りに 360deg 全方向の観察が可能な視野変更方法を提案する。
- ◆ それぞれの視野変更方法について、プロトタイプを制作し、性能評価実験を行い、提案した視野変更方法、並びに開発した視野可変内視鏡の有用性を検証する

[ビームスプリッタを用いた視野変更方法]

本視野可変内視鏡は内視鏡とそれを収める内側スリーブおよび外側スリーブからなる。外側スリーブに関しては、正面には偏光板を、側面には観察窓を設ける(Fig.1(a))。内側スリーブに関しては、硬性鏡或いは CCD カメラの先端部にビームスプリッタを配置し、正面には偏光板を、そして側面には観察窓を設ける(Fig.1(b))。ただし、偏光板の向きは Fig.1 のような姿勢で正面が見えないように設置する。

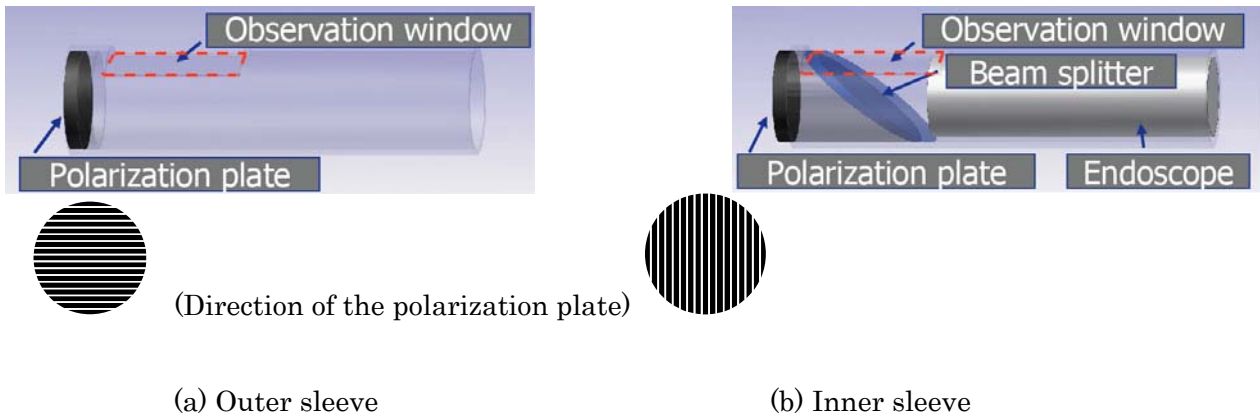


Fig.1 Distal tip configuration

この状態で、内側スリーブを外側スリーブに挿入すると、観察窓が同一な向きとなり、かつ偏光板はお互いに直交の向きとなるため、正面からの光は遮断されることとなり、側面の観察が可能になる (Fig.2(a)).

また、外側スリーブを 90deg 回転させると、Fig. 2(b)のように観察窓は閉じ、偏光板は同一方向となるため正面の観察が可能になる。

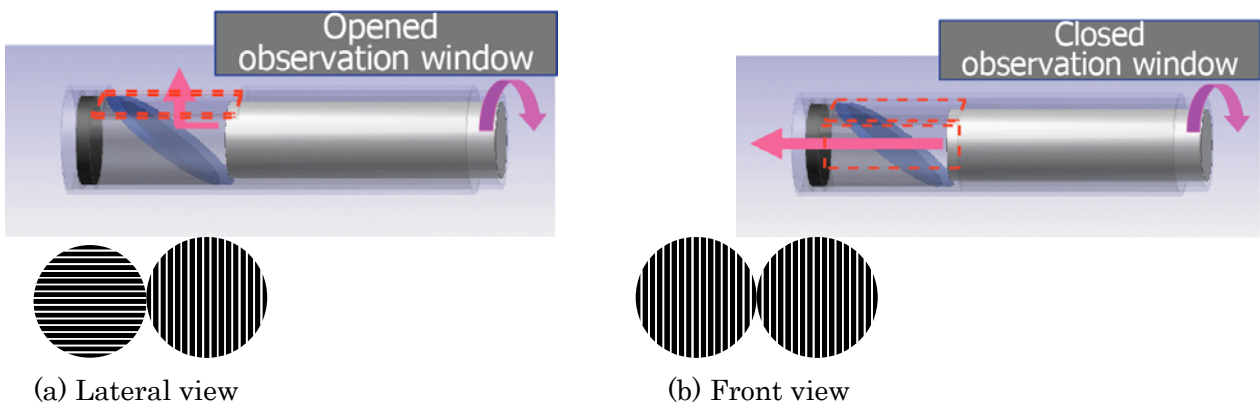


Fig.2 Field of view change mechanism

制作したプロトタイプを示す(Fig.3). 照明系を含めた外径は $\phi 10\text{mm}$ である.

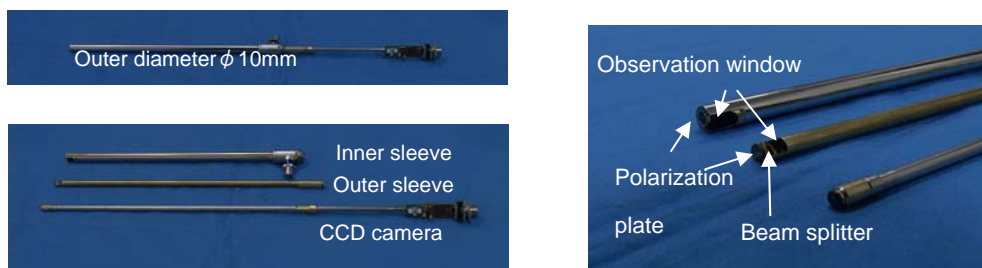


Fig.3 Prototype of FOV changeable endoscope using a beam splitter

内側スリーブには、先端部にビームスプリッタと偏光板を搭載する。正面観察の際には、偏光板を通しての観察であるため、明るさがやや落ちる問題があり、それを解決するために透過率 70%、反射率 30%のビームスプリッタを用いることにした。外側スリーブには、偏光板と照明用光ファイバを搭載する。また、それぞれのスリーブには側面観察のための観察窓を用意する。CCD カメラが収められた内側スリーブを外側スリーブに挿入し、回転させることで直視と側視の視野変更が可能となる。

Fig.4 に評価実験の結果を示す。

まず、Fig.4(a)の状態、偏光板はお互いに直交の向きであるため、正面は見えなくなり、観察窓を通して側面を観察することが可能となる。この状態で外側スリーブを回転させると、Fig.4(c)のように徐々に直視に切り替えられ、外側スリーブを 90deg 回転させると、観察窓は閉じ、偏光板は同一向きになるため、Fig.4(b)のように正面の観察が可能となる。以上のように、外側スリーブの回転のみで視野の変更が可能であることが分かる。

直視では胎児の口と鼻が、側視では胎児の手が明確に観察できる。直視、側視の両方とも高画質で、鮮明に観察することが可能である。

さらに、照明に関しても、直視と側視の両方とも十分に明るい画像が得られた。

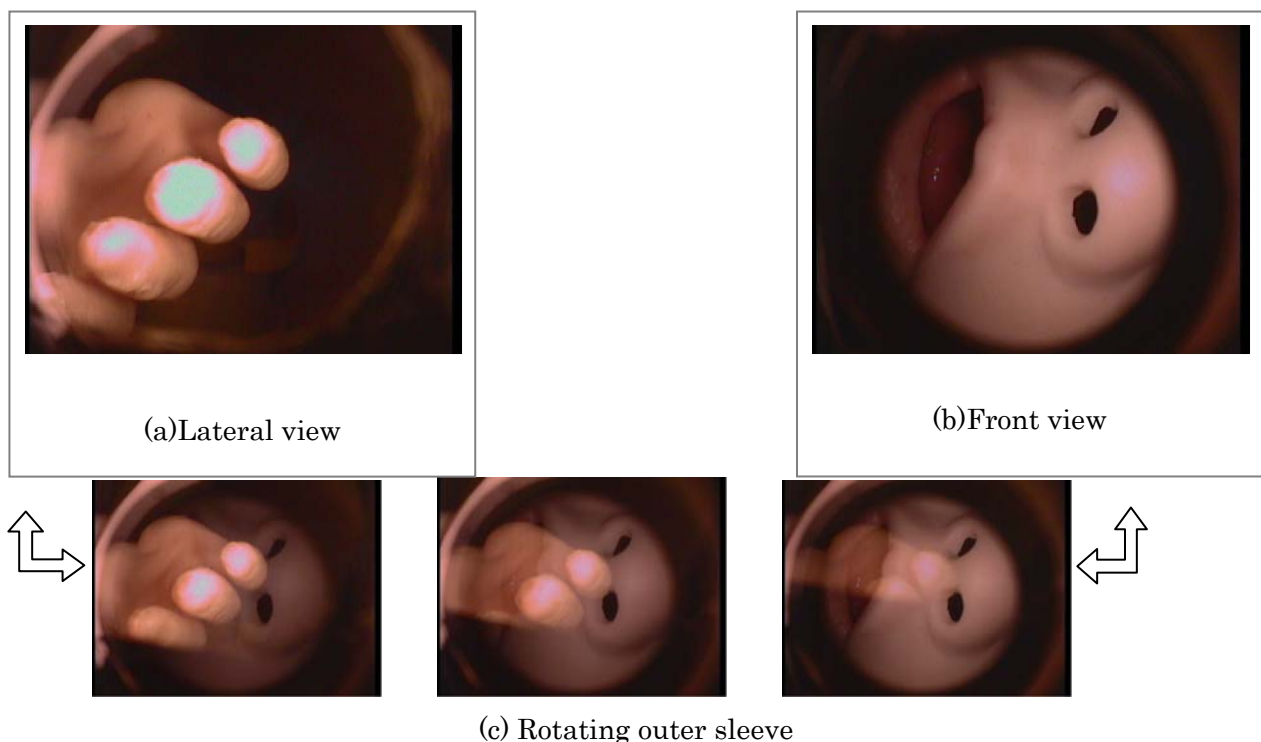


Fig.4 Fetal model images

[ウェッジプリズムを用いた視野移動方法]

ウェッジプリズムは Fig.5 のような形状のレンズであり、光を屈折させる機能を有する。ウェッジプリズムを用いた視野可変内視鏡は、一般的に用いられている硬性鏡の先端部に 2 個のウェッジプリズムを配置し、光軸を屈折させることで視野の移動を実現する。さらに、ウェッジプリズムを 2 個用いることで、視野方向の移動角度を拡大し(Fig.6(a))、また、斜視鏡では観察不可能である視野の中心

方向も観察可能となる(Fig.6(b)).



Fig.5 Wedge prism

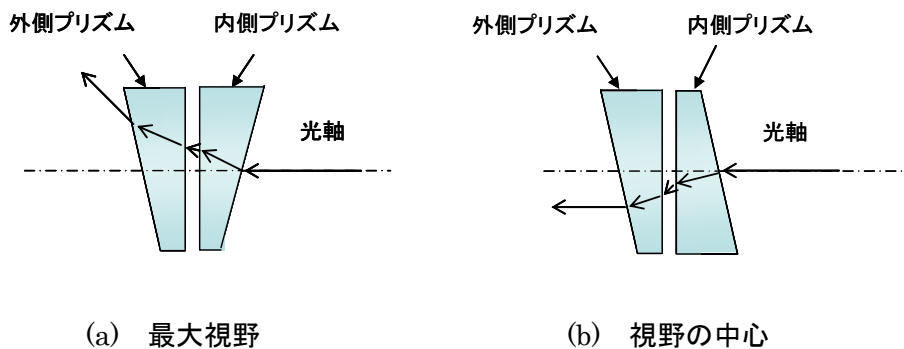


Fig.6 ウェッジプリズムによる光軸の屈折

2 個のウェッジプリズムを硬性鏡の先端部に配置し、それぞれを独立に回転させることで、光軸を屈折させ、視野の移動を実現する(Fig.7).

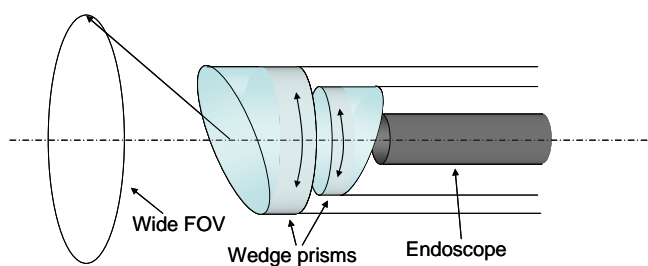
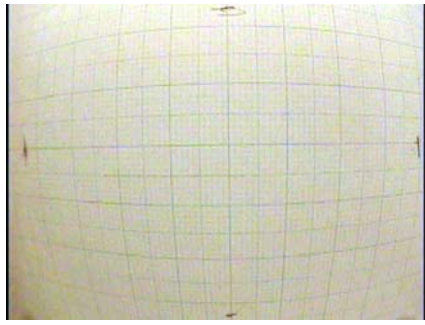
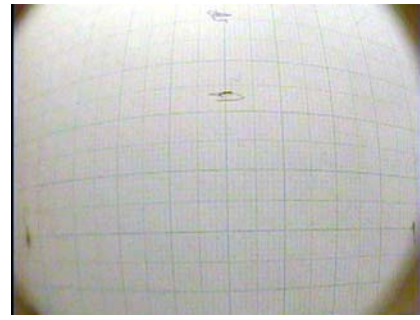


Fig.7 ウェッジプリズムを用いた視野移動の原理

本視野可変内視鏡を胎児外科に臨床応用するために、外径 $\phi 4.3\text{mm}$ の細径先端部プロトタイプを製作した。製作したプロトタイプを用い、視野範囲の測定を行った(Fig.8)。Fig.8(a)は、CCD カメラのみでの撮像結果を示し、Fig.(b)は製作した先端部のプロトタイプを用いた、最上部の撮像結果である。



(a) CCD カメラのみで撮像



(b) 先端部のプロトタイプで撮像（最上部）

Fig.8 視野範囲の測定

撮像画面の中心から、最上部までの最大視野移動角は約13degであり、それにより全体視野範囲を計算すると、約103 x 83deg（横 x 縦）である。

[変形コーンミラを用いた視野変更方法]

本視野変更方法では、コーンミラの尖った部分をカットし、中心部に穴を開いた変形コーンミラを用いて視野変更を行う。コーン部のみを反射面とする(Fig.9)。

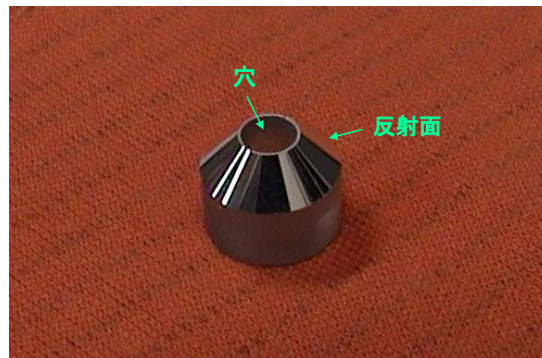
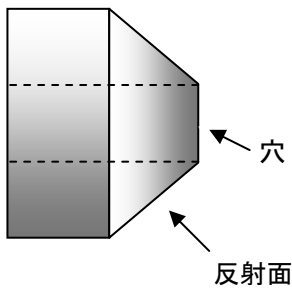
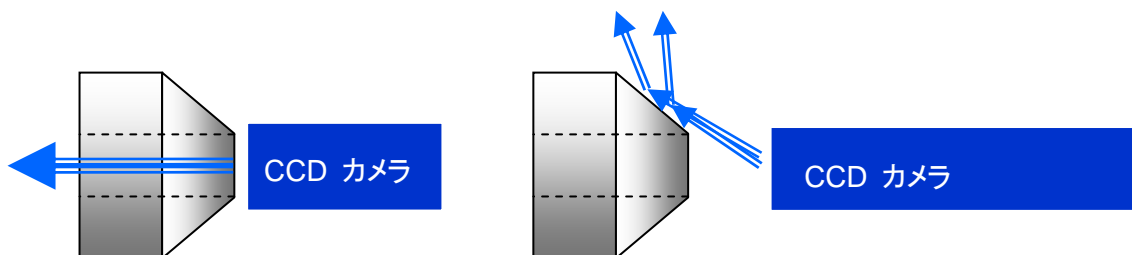


Fig.9 変形コーンミラ

CCD カメラの先端部に変形コーンミラを配置する。CCD カメラを変形コーンミラの穴に近づけることで、正面の観察が可能となる(Fig.10(a))。また、変形コーンミラから CCD カメラを離れるようにするとコーン部での反射により、側面の 360deg 全方向を観察することが可能となる(Fig.10(b))。

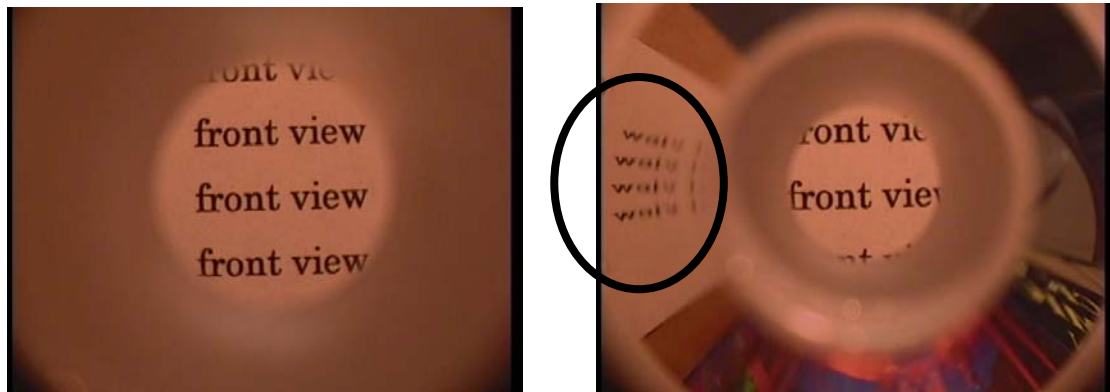


(a) 直視

(b) 側視（360deg 周り）

Fig.10 変形コーンミラを用いた視野変更手法

本視野可変内視鏡のプロトタイプを製作し、評価実験を行った。正面と側面の撮像結果を示す(Fig.11)。正面の画像は高画質であるが、視野が非常に狭い。これは、中心部の貫通穴が円筒型になっていることが原因である。側面の画像はコーン部での反射による画像であるため、歪曲収差が大きい、視野が非常に狭い問題があった。また、側面観察のため、アクリルパイプを使っているため、強度の問題や、外径が大きくなる問題があった。



(a) 正面の観察

(b) 側面（周り）の観察

Fig.11 変形コーンミラでの撮像結果

変形コーンミラ式視野可変内視鏡を用いた評価実験の結果に基づき、変形コーンレンズを用いた視野変更方法を提案する。

設計した変形コーンレンズを示す(Fig.12)。正面観察用の中心穴はコーンの形状であるため、より広い視野角が得られる。そのため中心穴の外径を小さめにするのが可能となり、コーン部は大きくなるため、側視の視野は広がる。また、変形コーンレンズの片方は段になっており、ステンレスパイプに簡単に固定可能である。視野変更方法は変形コーンミラ式と同様である。

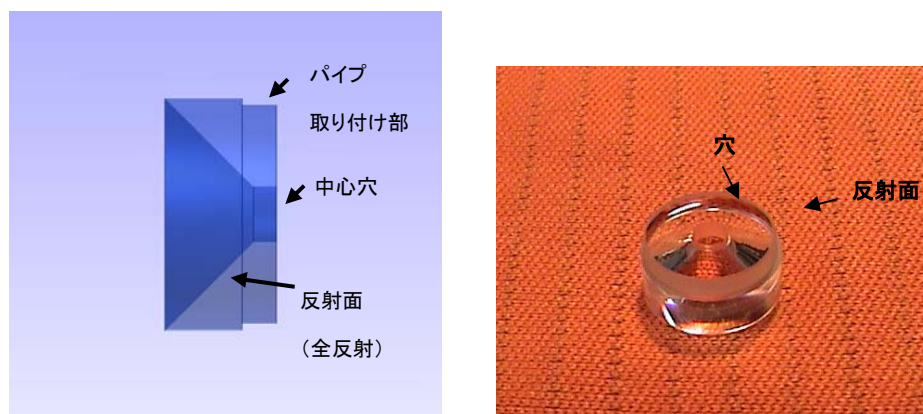
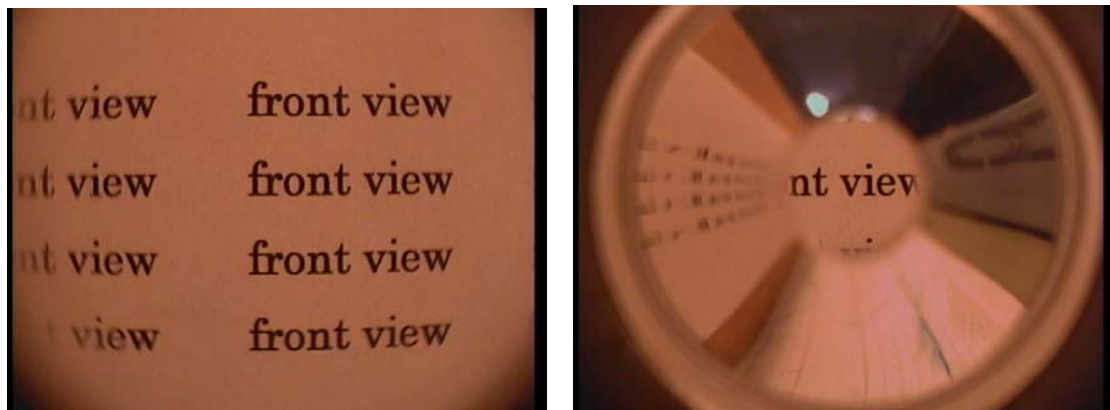


Fig.12 変形コーンレンズ

正面と側面の撮像結果を示す(Fig.13)。正面の画像は高画質であり、広い視野が得られた。これは、CCDカメラのみを用いた時に比べてもほとんど変わらない程度である。側面の画像もコーンミラ式に比べると広い視野が得られたが、歪曲収差が大きい、焦点が合っていない等の問題点があった。また、反射による画像が滑らかでないことは、コーン部が凹の形状であるため、加工が非常に難しく面精度が悪いことが原因である。



(a) 正面の観察

(b) 側面（周り）の観察

Fig.13 変形コーンレンズでの撮像結果

[考察]

ビームスプリッターを用いた方式では、一本の内視鏡で正面と側面の観察が可能であり、細径化が可能であるため、胎児外科への臨床応用に向いている。

ウェッジプリズムを用いた方式では、正面観察と正面を中心として視野を移動させることが可能である。しかし、その移動量はウェッジプリズムでの全反射により約 20deg と制限される。よって、患部が挿入位置から 20deg 以内に位置する場合は、患部の観察が可能であるが、それより側面に位置する場合は観察が困難である。

変形コーンレンズを用いた方式でも、正面と側面の観察が可能であるが、現時点では視野が狭く画質が悪いため実際の観察は困難な状態である。さらに、変形コーンレンズ方式は細径化が困難であるため、胎児外科への臨床応用のためには、まだ多くの課題が残っている。

[結論]

本研究では、従来の内視鏡では観察が不可能であった領域を、安全に観察するための視野変更方法に関して研究を行った。本論文で提案した視野変更方法は、すべて内視鏡本体を固定した状態で、スリーブの回転のみで視野変更を行うため安全性に優れており、様々な医療分野で活躍できると考える。