

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04167

研究課題名（和文）光ファイバによる新しい計測医療技術の研究

研究課題名（英文）Advanced medical measurement technology using optical fiber

研究代表者

深野 秀樹（Fukano, Hideki）

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：60532992

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ガラス素材で構成した新しい温度センサが集積された温熱プローブを研究開発し、さらに、温度測定波長と異なるレーザ波長を昇温に利用する波長多重モジュールを試作し、同時照射による特性の測定を行った。吸収長が長くなる近赤外レーザ光を疑似生体等に照射し、光吸収によって発生した熱による昇温を、プローブ先端の温度センサで精度よく測定できることを実証し、その有望性を明らかにした。また、従来のファイバースコープと異なるレンズ原理応用の通信用のグレーデッドインデックスマルチモードファイバを用いた極細光ファイバ画像モニタの研究を行い、従来に比べて10倍以上の長さにおいても集光を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光は、電磁信号の影響を受けないという大きなメリットを有する一方で、従来の電気信号を検出するための計測概念や計測用電子素子を用いることなく、光のみで物理量を測定する新しい手法の研究が必要である。光のみを利用する本研究の光ファイバシステムは、医療応用におけるX線CTやMRIのマクロな観察環境下で併用でき、これまでにない、治療状況判断を計測数値やミクロな細胞レベルの観察をプラスして行えるため、過剰な治療領域を無くし、患者負担の軽減と早期回復など大きな効果をもたらすことが期待できる。

研究成果の概要（英文）：We developed a Fabry-Perot interference temperature sensor having two reflection interfaces inside a sensor probe. The sensor demonstrates excellent temperature characteristics with a linear relationship between temperature and interference wavelength. This probe operates using wavelength division multiplexing technique. Laser ablation and temperature monitoring are simultaneously performed using near-infrared semiconductor laser light and light with 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength range, respectively. The results demonstrate that the new optical fiber probe for laser ablation has high potential because it can monitor the temperature of the ablation region with fine resolution.

A graded-index multimode fiber that can provide an imaging by means of different principle with an ordinary fiber scope has been investigated using low dispersion wavelength light. It is confirmed that the light is focused with a distance that is more than 10 times longer than that of conventional technique.

研究分野：フォトンクス

キーワード：光ファイバ 温度センサ レーザ照射 温熱プローブ 温熱治療

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光は、電磁波の影響を受けないため、その特徴を生かせる電磁雑音の多い工場や自動車内データ伝送などへ応用展開が図られている。電磁信号の影響を受けないという大きなメリットは、一方で、電磁信号の計測ができないため、従来の電気信号を検出するための計測概念や計測用電子素子を用いることなく、光のみで物理量を測定する新しい手法の研究が必要である。光のみを利用する本研究の光ファイバシステムは、X線CTやMRIのマクロな観察環境下で併用でき、これまでにない、治療状況判断を計測数値やミクロな細胞レベルの観察をプラスして行えるため、過剰な治療領域を無くし、患者負担の軽減と早期回復など大きな効果をもたらすことが期待できる。また、医療応用におけるX線や極めて強い磁場中など、一般の産業応用に比べて、厳しい環境下での動作を目標とするため、この環境下での動作を前提とした研究開発成果は、その他の過酷な環境下の計測に広く応用することが可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、生体医療行為において欠かせない、温度制御・測定と画像モニタの2つの技術に関して、ファイバ通信用光デバイス及び光ファイバを応用して、これまで不可能であった局所的部位や深部における計測に挑戦する。ファイバ自体に温熱領域の温度を高精度に計測できる光ファイバ型温度センサの機能を付与する。生体内で選択的に温熱処置を可能とする光熱変換ファイバを実現する。光熱変換には光通信用の低コストな半導体レーザ増幅器及び石英系光ファイバを用いる。水の吸収線とほぼ合致する発振波長の高出力光通信用半導体レーザ光の照射により、水分の光吸収に伴い熱が発生する。光ファイバの先端への特殊加工技術を開発し、レーザ光の集光・拡大の自由度、及び光吸収長が、レーザ光波長可変技術との融合により、用途に応じて広範囲に設定できるようにする。さらに、ファイバ先端部の細胞状況を観察できる極細光ファイバ画像モニタシステム機能を研究開発し、処置の高精度化と共に正常組織への影響を最小限に抑える技術を実現する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 高精度温度センサ機能をファイバ先端に付与する仕組みの新研究

特殊ファイバをシングルモードファイバ(SMF)先端に融着し、先端形状を精密制御。特殊ファイバ部を含む異種接合界面を形成し、2つ以上の界面からの反射光による干渉光を生成し、その干渉スペクトルの温度変化に伴う波長シフトを利用して温度を測定する新しい仕組みを研究。この干渉光は、原理的には、極めて短いファイバ長で実現できることが予想され、挿入型の医療応用に必要な微小領域のセンシングのための短いセンサ長が実現できると考えられる。良好な干渉スペクトルを実現するために必要な各種異種接合界面及び形成条件を検討する。

#### (2) 集光制御可能な石英系光ファイバの作製と波長変化による集光特性の変調と温熱領域の制御

これまで、大きな吸収ピーク(短吸収長)に対応する波長 $3\mu\text{m}$ のEr:YAGファイバレーザや、 $10\mu\text{m}$ の炭酸ガスレーザが、細胞を破壊して切り裂く観点からレーザメスとして主に研究開発されている。しかしながら、適度に吸収長が長くなる近赤外領域のレーザ光による検討は無く、温熱治療(ハイパーサーミア)として注目されている、切るのではなく適度に熱を加える視点での全く新しい知見を得る。また、発熱領域は熱拡散により光吸収長より大きくなる。熱拡散はレーザ光の波長やパワーを制御して実効長を制御でき、それらの制御と温熱領域の関係を実験的に明らかにすることは治療応用にあたり重要である。レーザ照射による温熱領域をサーモカメラで計測することにより、温熱領域のレーザ制御技術を確立する。ファイバ構造と焦点の関係、および、照射による温熱領域の関係を実験観察により明らかにする。

#### (3) 極細ファイバ画像モニタの研究

グレーデッドインデックスファイバ(GIF)では、光は周期的に収束を繰り返し伝搬。適切なファイバ長設定で、レンズ効果(先端部の物体の拡大や縮小像を他方の端面側に形成)。GIFの集光点を先球レンズ機能を有するMMF接合部に一致させ、極細ファイバによる画像中継を行い後方端面に像を結ぶ。従来の多数のファイバを束ねた太径のファイバスコープと異なる極めて長いセルフフォーカスレンズの原理に基づく結像の長尺化に挑戦する。GIFのみで、可視光では、材料分散特性に起因した収差(可視光域では約 $420\text{ps/km/nm}$ )が大きいため、ゼロ分散になる $1.3\mu\text{m}$ 近傍の光により、数 $\text{ps/km/nm}$ に分散を抑え、 $40\text{cm}$ 程度のファイバ長で画像化可能とする技術開発を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 高精度温度センサ機能をファイバ先端に付与する仕組みの新研究

極細コア径特殊ファイバ部で径方向で共鳴するエバネッセント光を生成し、先端部で反射させ、共鳴エバネッセント光の浸み出し長から温度を測定する新しい仕組みの研究を行った。極細コア径特殊ファイバ部の長さが $1\text{mm}$ 以下で、その部分にシリコンゴム被覆を施した構造において、 $-40$ 以下まで温度測定が可能であり、温度分解能 $0.1$ 以下を達成した。

一方、シリコンゴム被覆において低温冷却により周囲媒質が凍結した場合、センサ部への圧力に変化が発生し、これが、測定結果に影響することが明らかとなった。このため、圧力変化がセンサ部に直接影響しないような保護構造の検討を行なった。具体的には、ファイバの先端部にガラスキャピラリを接合し、その中にシリコンゴムを挿入することで、キャピラリ外壁が保護層として作用する。この構造により、圧力変化に対して有効であることを確認した。

低温冷却による周囲媒質の凍結に伴う圧力変化の対応する新たな構造として、シリコンゴムのような柔らかな素材を使わない構造の検討を行なった。具体的には、すべてガラス素材で構成した新規温度センサ構造であり、3種類の構造を検討し、それぞれの構造における特性測定によって、特徴の把握を行った。基本的な形は、異なるファイバの融着により、光軸上に2つ以上の光の反射点を形成し、戻り光による干渉によって特定の波長域に周期的なファブリペロー干渉スペクトルを形成する構造である。また、先端部には、反射光を抑制する特殊構造を形成する新しい手法を考案した。温度変化によって線形性良くスペクトルのシフトが起こり、昇温および降温における特性の再現性・安定性も極めてよい。すべてガラス素材で構成した新規温度センサにおいて、それぞれのセンサの温度特性および構造の製作容易性について調査検討を行った。センサ部の製作トレランスが大きく、利用波長の設計制御性に優れた構造を選定した。試作した温度センサプローブの一例の概略図を図1に示す。センサプローブは、シングルモードファイバ (SMF)、グレーデッドインデックスファイバ (GI100)、およびガラスキャピラリで構成されている。SMFとガラスキャピラリ、ガラスキャピラリとGIファイバ、GIファイバと先端が埋められたガラスキャピラリキャップの間の境界面が、それぞれMirror 1, Mirror 2, Mirror 3として機能し、ファブリペローキャビティを形成している。キャピラリーキャップの先端が8°以上の角度になっているため、キャピラリーキャップと外部媒質との境界面での反射光はファイバに戻らないようになっている。この温度センサの基本構造は、低温から高温までの広い範囲で優れた温度特性を示し、特許出願すると共に、国内学会および国際会議にて発表し、学術論文としてまとめている。

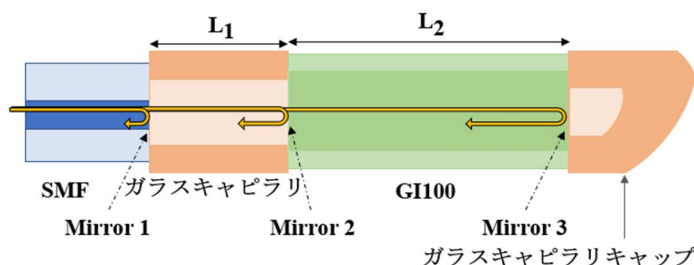


図 1. 温度センサプローブの概略図

## (2) 集光制御可能な石英系光ファイバの作製と波長変化による集光特性の変調と温熱領域の制御

レーザ照射による温熱領域をサーモカメラで計測するための実験系の準備を行い、1.48 μmレーザ光による水滴および生体を模倣した鳥胸肉へのレーザ照射特性の評価を行なった。水滴と鳥胸肉では、レーザ光照射による昇温領域の温度上昇時定数および昇温領域に大きな違いがあることを実験的に初めて明らかにした。

選定温度センサが集積された温熱プローブを実現し、さらに、温度測定波長と異なるレーザ波長を昇温に利用する波長多重技術を可能とする波長分割多重 (WDM) 装置を製作し、事前に測定した温度センサ特性を用いて、その場でファイバ先端部の温度値をパソコン画面に表示できる、同時照射による温度計測システムを試作した (図2)。Amplified Spontaneous Emission (ASE) 光源からの広帯域波長光に加えて、Laser Diode (LD) ユニットから加熱用レーザ光をそれぞれ出力する。二つの光がWDM装置で一つの光として合波されファイバプローブに出力される。プローブで反射した光のうち、ASE光源の成分のみ分波されて光スペクトラムアナライザ (OSA) で測定した反射スペクトルをパソコンにて解析し、センサ部の温度を画面表示する。

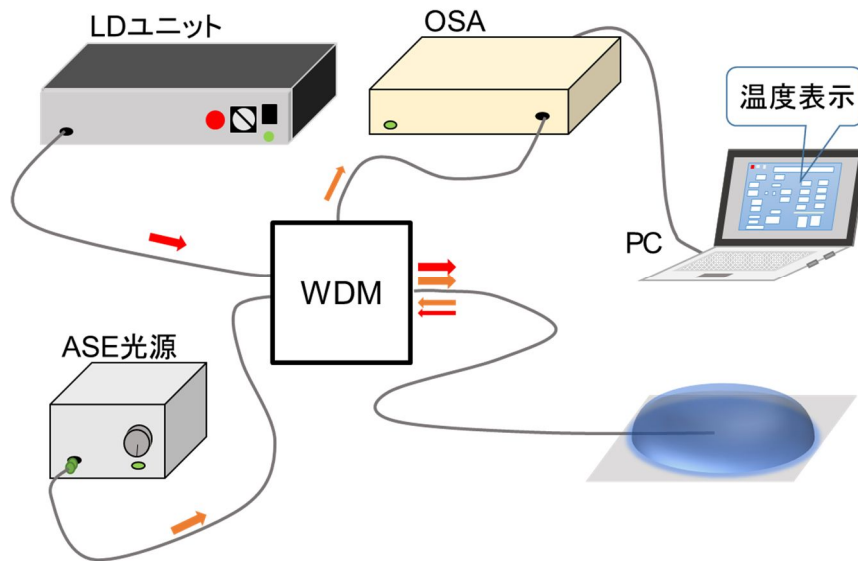


図2. レーザ光同時照射温度計測システムの概略図

吸収長が長くなる近赤外レーザー光による、適度に温める視点で、 $1.48\ \mu\text{m}$ レーザー光に加え、光吸収長が長くなる $1.3\ \mu\text{m}$ レーザー光を水滴および鳥胸肉に照射し、光吸収によって発生した熱およびその熱拡散と昇温領域の関係を実験観察により明らかにした。両波長において、レーザー照射パワーの増大に伴う、昇温領域の線形的な増大とハイパーサーミアに必要な $50\ \text{°C}$ までの昇温が低パワーで得られることを確認した。さらに、波長による光吸収長の違いにより、波長の切り替えのみによって深部まで容易に温熱領域を拡大でき、これまででない新しい適用拡張性が確認できた。

また、ファイバ先端部に放電加工を施して球面構造を製作し、加温用のレーザー光の広がり形状を変化させ、加温領域を制御する技術の検討を行った。球面構造の曲率半径を変化させることにより、レーザー光の光線軌跡を可変でき、その結果、加温領域を制御できることを明らかにした。同時に、温度計測に用いる周期的なファブリペロー干渉スペクトルに影響しないように構造設計することが可能であることが明らかになり、温度変化による線形性の良いスペクトルのシフトが維持でき、昇温および降温における特性の再現性・安定性を確認できた。

### (3) 極細ファイバ画像モニタの研究

従来のファイバスコープと異なるレンズ原理応用の通信用のグレーデッドインデックスマルチモードファイバ(GIF)を用いた極細光ファイバ画像モニタの研究を行った。このファイバは、 $1.3\ \mu\text{m}$ 波長帯で波長分散が小さくなる性質があり、この波長帯の光によって、ファイバ内における光の繰り返し集光現象を透過光の焦点測定により確認した。

具体的には、GIFの集光性をSMF-GIF接合を用いて確認した。また、作製した1ピッチ長付近の各ファイバ長におけるバックフォーカスをそれぞれ測定し、その関係からGIFのコアの屈折率と光が平行光になるまでの距離にかかわる倍率を算出した。分散の大きな $0.8\ \mu\text{m}$ 以下の可視波長帯に比べて、10倍以上の長さにおいても集光現象を確認できた。低分散な近赤外波長帯での集光を確認でき、GIFを凸レンズとして機能させて結像したものを観察することが十分可能であることが明らかとなった。GIFによる内視鏡を実用化できれば、極めて細いため低侵襲であり、構造が単純で安価なため、様々な分野で活躍することが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Fukano Hideki, Yoshioka Kazuki	4. 巻 59
2. 論文標題 Fiber-optic temperature sensor with selectively enhanced Fabry-Perot interference using focusing effect of graded-index fiber for cryotherapy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S00D05-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab9650	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 Hideki Fukano and Kazuki Yoshioka	4. 巻 1
2. 論文標題 Fabry-Perot Optical Fiber Temperature Sensor using Graded-Index Fiber for Cryotherapy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 24th Microoptics Conference (MOC2019)	6. 最初と最後の頁 236 ~ 237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/MOC46630.2019.8982783	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 三角 純平, 深野 秀樹
2. 発表標題 ハイパーサーミアのための全ガラス製光ファイバ温度センサの提案
3. 学会等名 2020年度 (第71回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石川 正志, 深野 秀樹
2. 発表標題 温熱療法のためのフリップ・ヘーロー干渉光ファイバセンサの検討
3. 学会等名 令和元年度 (第70回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Fukano and Kazuki Yoshioka
2. 発表標題 Fabry-Perot Optical Fiber Temperature Sensor using Graded-Index Fiber for Cryotherapy
3. 学会等名 24th Microoptics Conference (MOC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 温度変化検出装置及び温熱治療装置	発明者 深野 秀樹	権利者 国立大学法人 岡山大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-190978	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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