

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560044

研究課題名(和文) 可動マイクロバンドによる2 $\mu$ m帯チューナブルQスイッチファイバレーザの研究研究課題名(英文) Studies of 2 $\mu$ m-band tunable Q-switched fiber lasers using variable microbend

研究代表者

坂田 肇 (Sakata, Hajime)

静岡大学・工学研究科・教授

研究者番号：40377718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：トリウム添加ファイバレーザにおいて、Qスイッチ発振ならびに可変波長制御を全ファイバ構成で実現した。 piezoelectric actuatorを用いて利得帯域での動的損失を得るため、ファイバの被覆層のみを偏平化し、そこへ可動性のマイクロバンドを形成した。その結果、出力100 mWクラスの1.63 $\mu$ mレーザダイオードを励起光源として、発振波長1.9 $\mu$ m帯、ピーク出力Wクラス、パルス幅1 $\mu$ sのレーザパルスを得た。また、コイルばねを利用して可変ファイバグレーティングを形成することで可変範囲100 nmの発振波長制御を行った。

研究成果の概要(英文)：We attained the Q-switched pulse oscillation and wavelength tuning in Tm-doped fiber lasers with all-fiber configuration. In order to obtain the dynamic loss in the gain band using a piezoelectric actuator, we formed variable microbending into the fiber in which the coating layer was flattened. When the 100 mW-class laser diode emitting 1.63 $\mu$ m wavelength was used as the pump source, the output laser pulse showed the emission wavelength of typically 1.9 $\mu$ m and the peak power of order of watts with a pulse width of 1 $\mu$ s. We also demonstrated the wavelength tuning span of 100 nm by means of the tunable fiber grating formed by the coil spring.

研究分野：工学

キーワード：ファイバレーザ 動的マイクロバンド 長周期ファイバグレーティング

## 1. 研究開始当初の背景

ツリウム添加ファイバ (TDF) が発する波長 1.7~2.1  $\mu\text{m}$  の光は、眼への影響が小さくアイセーフ光として知られる。期待される分野としては、(1)  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、メタン等温室効果ガスの吸収線と重なることから環境センシングへの応用、(2) 水に対する吸収係数変化が大きいことから生体組織の切開や止血に優れた医療用レーザーへの応用、(3) 大気透過率の高いことからライダーや空間通信への応用など、環境計測・医療・通信分野など幅広い応用が望まれている。

現在、研究されているファイバレーザーの多くにおいては、Q スwitching や発振波長チューニングを行うために、光をファイバ外に一旦取り出し、光変調器や回折格子を介した後、再びファイバ内へ戻す所謂外部共振器方式を採用している。そのため、光学調整の煩雑化、装置の大型化、量子効率低下は免れえない。さらに、高出力を得るには高出力の励起光源を必要とするため、レーザーシステム全体の大型化や消費電力の増大につながる。

以上を鑑み、研究代表者は低電力駆動での高出力パルス発生、さらに発振波長チューニングをすべてファイバ内で完結するレーザーシステムを目指した。本研究の達成により、分析機能に優れた環境センシング、制御性の高い医療用レーザー、広帯域性を有する空間通信光源など新たな応用分野を開拓することを将来の目標とした。

## 2. 研究の目的

第1の研究目的は、ファイバから光を取り出さずにファイバ外部からの応力のみで効率よく Q スwitching を行う点にあった。そのため、ピエゾアクチュエータ (PA) を用いてファイバに動的マイクロバンドを形成することで共振器 Q 値の制御を行った。PA は無負荷状態であれば数百 kHz の共振周波数を発するが、ファイバ押圧に使用すると応答性が劣化し変位量も減少すると見込まれた。そこで、小さい変位量で効率よく損失制御を行うためのファイバや装置の研究を目的とした。

第2の研究目的は、ファイバ内で発振波長を選択できる可変帯域通過フィルタを構築する点にあった。帯域通過フィルタ機能をファイバで実現する手段としては、ファイバブラッググレーティング (FBG) の反射スペクトルを利用する方法が報告されている。しかし、FBG に対して加熱や伸張を加えても波長可変範囲は限られ、耐久性や消費電力の問題も生じる。長周期ファイバグレーティング (LPFG) を利用すれば波長可変範囲は広がるが、LPFG は一般にコアモードから放射モードへの結合に基づくため帯域阻止フィルタとなる。そこで、LPFG を転じて帯域通過フィルタとして機能させ、発振波長選択を行うこと

をもう一つの研究目的とした。

以上述べたように、本研究の目的は 2  $\mu\text{m}$  帯ファイバレーザーの小型化、高性能化、高機能化を、全ファイバ構成を保ったまま実現することにあった。

## 3. 研究の方法

### (1) ファイバへの周期応力負荷によるレーザー共振器損失の制御

低電力動作によるパルス発生のための研究方法として、以下の3つを取り上げた。

ピエゾ Q スwitching: 限られた応力負荷で効率よく Q スwitching を実現するため、マイクロバンドの損失波長が利得帯と重なるように、PA を備え付けた櫛状基板の周期を解析と実験で設計した。櫛状基板はファイバを挟んで噛み合うように向かい合わせられ、電圧印加によりファイバ中にマイクロバンドを形成する。

ファイバ被覆層の偏平化: PA の動的負荷を軽減し、ファイバへのマイクロバンド形成・消去を繰り返す動作を安定させるため、ファイバのコア/クラッド形状は保ったまま、被覆層のみを偏平加工する。偏平形状は、被覆材料の軟化温度で側方圧縮を行い、冷却を経ることで得られる。

レーザーダイオード (LD) 変調励起による利得スwitching: 励起 LD の発光時間を  $T_m$  の緩和時間程度に合わせることで省電力化を行い、さらに PA の立下り (高 Q 時) にはファイバ弾性による遅れを補償するため、急峻な電流パルスを加える。PA の立上り (低 Q 時) には PA の応答速度を補償するため、励起電流を瞬時に遮断する。上記一連の駆動動作で、共振器 Q 値を急峻に切り替え、パルス幅が短く尖頭値の高い光パルスを発生させる。また、励起波長は量子欠損を最小限に抑えるため、発振バンド内の 1.6  $\mu\text{m}$  帯を用いた。この波長帯は光通信帯であり高速変調に優れ、変調励起を容易に行うことができる。

### (2) LPFG 帯域通過フィルタによるレーザー波長制御

ファイバレーザー共振器内に LPFG が誘起されると利得スペクトルが変化する。本研究では、発振波長の制御のため、ピッチ可変なコイルばねを通してファイバへの応力印加を行う方法について幾つかの研究を行った。

周期の異なる LPFG の直列結合: 異周期の LPFG を2つ結合し、シフトした損失帯で挟まれる通過帯を利用した。波長同調範囲を確保するため、LPFG は結合長を短くし損失帯幅を広げた。

LPFG の結合強さ制御: デジタルフォースゲージを用いたコイルばねへの加圧方式や、電磁石や Nd 磁石を用いてコイルばねを吸着する方式について研究を行った。

2モードファイバの利用:単一モードファイバではなく2モードファイバを利用することで、モード分散差の小さいコアモード間結合による帯域幅拡大を進めた。

#### 4. 研究成果

##### (1)ファイバ内Qスイッチングによる高出力パルスの発生

ファイバ中に動的マイクロバンドを導入するための制御機構を図1に示す。櫛状基板が取り付けられたPAがファイバの上下に配置され、これによりファイバ中に同周期のマイクロバンドを発生させる。櫛状基板の周期 $\Lambda$ は $750\mu\text{m}$ としたときに、波長 $1.9\mu\text{m}$ を中心としたTDFの利得帯において最も大きな損失を生じた。また、デューティ比 $d/\Lambda$ については、 $0.5$ より $0.2$ とした方が効率良く損失を得ることができた。

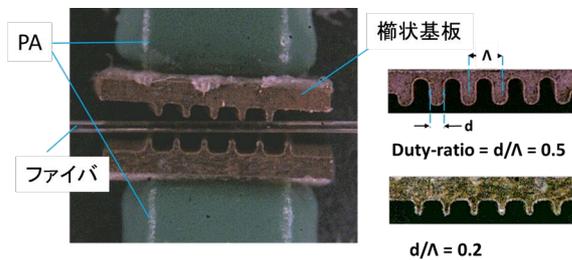


図1 マイクロバンド形成用櫛状基板の装着された piezoelectric actuator

マイクロバンド形成時のファイバ可撓性を向上させるためファイバを熱変形させた。元のファイバ素線が直径 $245\mu\text{m}$ であるのに対し、偏平化ファイバは典型的な値として長軸 $290\mu\text{m}$ 、短軸 $220\mu\text{m}$ に変形された。作製した偏平化ファイバと未加工の真円ファイバとで応答性を比較した結果を図2に示す。より小さな力で透過率が制御される様子がわかる。

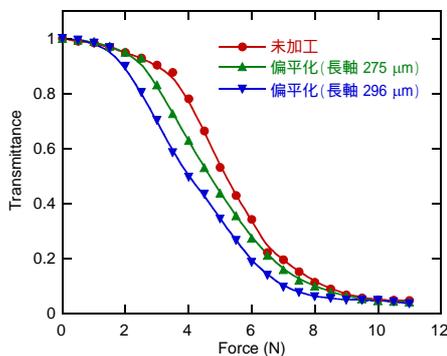


図2 PAによるファイバ透過率の制御

図3にQスイッチレーザの発振光スペクトルと光出力時間波形を示す。励起時間の終端で $20\mu\text{s}$ の期間、印加電圧をオフにすることでマイクロバンド損失を開放し、単一パルス動作を得た。典型的には、発振波長 $1.9\mu\text{m}$ 、バンド幅 $9\text{nm}$ 、パルス幅は約 $1\mu\text{s}$ であった。LD励起光強度に対する出力パルス光強度の関係を図4に示す。真円ファイバと偏平化ファイバとで出力特性に違いが見られた。真円ファイバでは励起光強度 $139\text{mW}$ で $1.07\text{W}$ の出力パワーが得られたのに対し、偏平化ファイバでは同様の励起光強度で $1.45\text{W}$ のパルス光強度が観測された。連続光モードでの出力が $18\text{mW}$ 程度であるので、パルス光強度でおよそ80倍に増加したことになる。

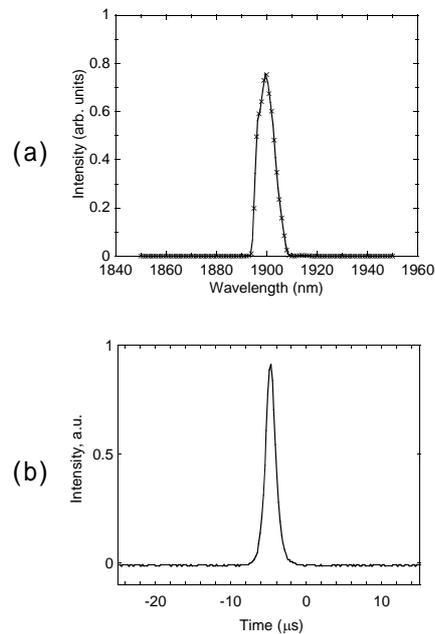


図3 Qスイッチ動作時の(a)発振光スペクトルと(b)時間波形

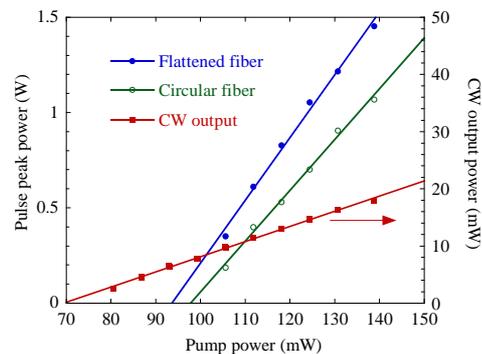


図4 レーザ出力特性

##### (2)可変ファイバグレーティングによる TDF レーザのチューナブル化

ファイバレーザの発振波長を制御するため、コイルばねを用いて可変周期のLPFGを

構成した。実験では、図5に示すように、(a) 機械式：デジタルフォースゲージで上部よりコイルばねに圧力を加えファイバを周期的に押着する構成、あるいは、(b) 磁力誘起式：電磁石でファイバ下部よりコイルばねを誘引することでファイバに周期的応力を与える構成を用いた。コイルピッチの伸縮に応じて LPFG 周期が変わるため、コアモード-クラッドモード間で生じる共鳴波長のシフトを制御できる。

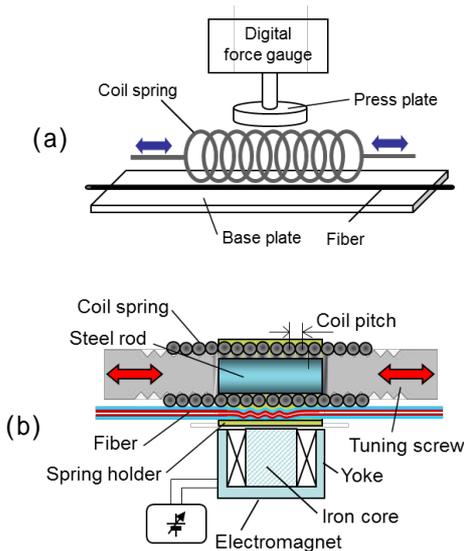


図5 可変 LPFG の構成例 (a) 機械式、(b) 磁力誘起式

図6は TDF の蛍光を用いて測定した LPFG の透過光スペクトルの測定例であり、クラッドモードとの結合で生じる損失ピークが確認できる。隣接する損失ピーク間に通過帯が現われ、レーザ共振器の利得ピークを操作する。図7は1個の可変 LPFG で発振波長を制御した例で、2つの損失ピークに挟まれるように 97 nm の可変範囲が得られた。波長可変範囲を制限する要因は、損失ピークの反対側に別の通過帯が現れることにある。そこで、固定周期 LPFG と可変周期の LPFG を組み合わせて、通過帯の機能する波長範囲の拡大を行った。その結果が図8であり、LPFG 周期を 750  $\mu\text{m}$  から 900  $\mu\text{m}$  まで変化させることで、TDF レーザの発振波長が 1865 nm から 1972 nm にシフトされる様子が示され、107 nm の波長可変範囲が得られた。さらに、損失帯幅を拡大できれば通過帯の有効可変波長範囲を拡張できる。そこで、現在、基本モード ( $LP_{01}$ ) と1次モード ( $LP_{11}$ ) 間の結合を利用する2モードファイバの応用を進めている。将来、TDF の 200 nm 以上に及ぶ利得帯幅(図7参照)をカバーする全ファイバ構成の波長可変レーザを実現するため研究を継続している。

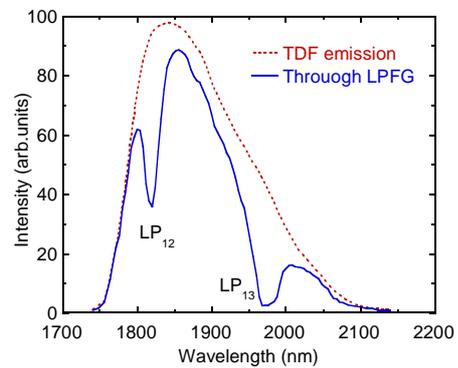


図6 TDF の蛍光スペクトルと LPFG の透過光スペクトル

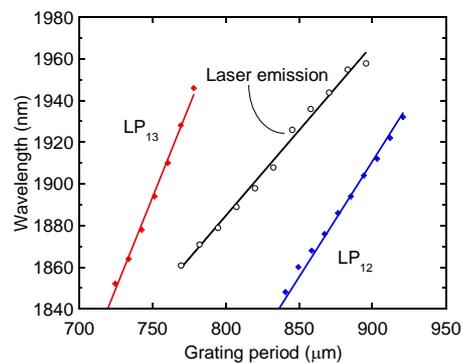


図7 LPFG の損失ピークシフトと TDF レーザの発振波長シフト

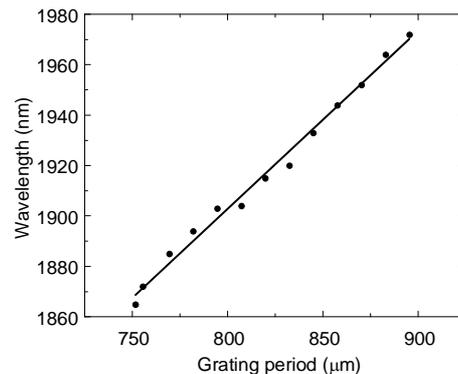


図8 固定周期と可変周期 LPFG を用いた TDF レーザ発振波長の可変特性

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

H. Sakata, K. Komori, and Y. Ono, Tunable bandpass filters based on  $\lambda$ -shifted mechanical long-period fibre gratings in two-mode fibre, Electronics Letters, 査読有, Vol.51, No.11, 2015, pp.843-835

DOI: 10.1049/el.2015.0635

T. Harada and H. Sakata, Polarization circulation effect in microbend-induced long-period fiber gratings for polarization-insensitive filter response, *Applied Optics*, 査読有, Vol. 54, No. 13, 2015, pp. 3937-3942

DOI: 10.1364/AO.54.003937

H. Sakata, K. Wakamiya, and S. Sasaki, Polarization-insensitive tunable LPFGs using magnet-induced microbend under torsional stress, *IEEE Photonics Technology Letters*, 査読有, Vol. 26, No. 9, 2014, pp. 904-907

DOI: 10.1109/LPT.2014.2309701

H. Sakata, H. Sano, and T. Harada, Tunable mode converter using electromagnet-induced long-period grating in two-mode fiber, *Optical Fiber Technology*, 査読有, Vol. 20, No. 3, 2014, pp. 224-227

DOI: 10.1016/j.yofte.2014.02.003

H. Sakata and K. Yamahata, Variable long-period fiber gratings controlled by Nd-Fe-B permanent magnet for erbium-doped fiber sources, *Microwave and Optical Technology Letters*, 査読有, Vol. 56, No. 4, 2014, pp. 864-867

DOI: 10.1002/mop.28250

S. Araki, K. Kimpara, M. Tomiki, and H. Sakata, Q-switched Tm-doped fiber lasers using dynamic microbend in oval-coating fibers, *Laser Physics*, 査読有, Vol. 23, No. 6, 2013, 065102

DOI: 10.1088/1054-660X/23/6/065102

M. Ichikawa, S. Araki, and H. Sakata, Wavelength control of Tm-doped fiber laser using nonidentical mechanical long-period fiber gratings, *Laser Physics Letters*, 査読有, Vol. 10, No. 2, 2013, 025101

DOI: 10.1088/1612-2011/10/2/025101

H. Sakata, T. Numano, and M. Tomiki, Loss tunable long-period fiber gratings controlled by electromagnet, *IEEE Photonics Technology Letters*, 査読有, Vol. 24, No. 19, 2012, pp. 1680-1682

DOI: 10.1109/LPT.2012.2212182

[学会発表] (計 2 3 件)

木船拓也、原田智弘、坂田 肇、ねじれファイバに形成したマイクロバンド誘起 LPFG の偏光特性、第 62 回応用物理学関係連合講演会、2015/3/12、東海大学 (神奈川県平塚市)。

高橋紀人、金原健太、坂田 肇、Tm ファイバリング共振器への CNT 挿入による Q スイ

ッチ発振、第 62 回応用物理学関係連合講演会、2015/3/12、東海大学 (神奈川県平塚市)。

坂田 肇、佐々木智史、若宮浩司、原田智弘、加圧ファイバ内の旋光性に基づくマイクロバンド誘起 LPFG の偏光無依存化、電子情報通信学会ファイバ応用技術研究会、2014/11/13、NHK 広島放送局 (広島県広島市)。

原田智弘、木船拓也、坂田 肇、偏光面回転を利用した電磁石駆動長周期ファイバの偏光無依存化、2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2014/9/24、徳島大学 (徳島県徳島市)。

佐野弘樹、大下拓也、坂田 肇、GI 形 2 モードファイバを用いた広帯域可変モード変換、第 75 回応用物理学学会学術講演会、2014/9/18、北海道大学 (北海道札幌市)。

H. Sakata, K. Kimpara, K. Komori, and M. Tomiki, Pulsed operation of Tm-doped fiber lasers using piezoelectric-driven microbend applied to elliptical coating fibers, *SPIE Photonics Europe*, 2014/4/15, Brussels (ベルギー)。

金原健太、小森研人、富木政宏、坂田 肇、動的マイクロバンド対の構築による Tm 添加ファイバリングレーザのパルス発振特性、第 61 回応用物理学関係連合講演会、2014/3/17、青山学院大学 (神奈川県相模原市)。

小森研人、金原健太、富木政宏、坂田 肇、偏平化コーティングファイバでの動的マイクロバンド特性、第 61 回応用物理学関係連合講演会、2014/3/17、青山学院大学 (神奈川県相模原市)。

K. Kimpara, K. Komori, M. Tomiki, and H. Sakata, Period and duty-ratio dependence of dynamic microbend in Q-switched Tm fiber ring lasers, *ODF 2014*, 2014/2/13, 板橋文化会館 (東京都板橋区)。

渡邊 健、相澤祐汰、富木政宏、坂田 肇、ファイバの周期的側面牽引によるチューナブル長周期ファイバグレーティングの作製と特性評価、平成 25 年度電気関係学会東海支部連合大会、2013/9/25、静岡大学 (静岡県浜松市)。

金原健太、小森研人、富木政宏、坂田 肇、周期性マイクロバンドによる 1.9  $\mu\text{m}$  帯 ASE 光の伝搬損失制御、平成 25 年度電気関係学会東海支部連合大会 2013/9/24、静岡大学 (静岡県浜松市)。

佐野弘樹、原田智弘、坂田 肇、電磁石駆動 LPFG による 2 モードファイバ中のモード変換、2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2013/9/20、福岡工業大学 (福岡県福岡市)。

T. Harada, M. Tomiki, and H. Sakata, Weighted coupling of electromagnet-driven long-period fiber gratings, CLEO-PR&OECC/PS2013, 2013/7/4, 京都国際会館 (京都府京都市).

H. Sakata, K. Yamahata, K. Wakamiya, Magnetic-force-induced tunable long-period fibre grating and its application in erbium-doped fibre systems, CLEO Europe 2013, 2013/5/15, Munich(ドイツ). 若宮浩司、山畑孝介、坂田 肇、磁力誘起長周期ファイバグレーティングの偏光特性評価、2013年電子情報通信学会総合大会 2013/3/21、岐阜大学(岐阜県岐阜市). 荒木隼悟、金原健太、富木政宏、坂田 肇、ピエゾ駆動マイクロベンドを用いた Tm ファイバレーザの Q スwitching、電子情報通信学会ファイバ応用技術研究会、2013/1/24、アステイ徳島(徳島県徳島市). 坂田 肇、山畑孝介、渡邊 健、原田智弘、再構成可能な長周期ファイバグレーティングの波長・損失制御、電子情報通信学会ファイバ応用技術研究会、2013/1/24、アステイ徳島(徳島県徳島市).

H. Sakata, S. Araki, T. Numano, and M. Tomiki, All-fiber tunable Q-switched Tm fiber lasers for greenhouse gas sensing, Optical Instrumentation for Energy & Environmental Applications, 2012/11/13, Eindhoven (オランダ).

山畑孝介、若宮浩司、坂田 肇、磁力誘起による長周期ファイバグレーティングの損失・波長可変制御、Optics & Photonics Japan, 2012/10/23、タワーホール船堀(東京都江戸川区).

原田智弘、沼野友善、富木政宏、坂田 肇、コイルスプリングの磁化圧着による長周期ファイバグレーティングの作製と損失制御特性、平成 24 年度電気関係学会東海支部連合大会、2012/9/25、豊橋技術科学大学(愛知県豊橋市).

②1 金原健太、荒木隼悟、富木政宏、坂田 肇、偏平化ファイバへの周期圧力印加による Tm ファイバレーザの Q スwitching 特性、平成 24 年度電気関係学会東海支部連合大会、2012/9/25、豊橋技術科学大学(愛知県豊橋市).

②2 荒木隼悟、金原健太、富木政宏、坂田 肇、偏平化ファイバ導入による Tm 添加ファイバレーザのピエゾ Q スwitching、第 73 回応用物理学会学術講演会、2012/9/13、愛媛大学(愛媛県松山市).

②3 沼野友善、原田智弘、富木政宏、坂田 肇、電磁石を用いた長周期ファイバグレーティングの損失可変動作、第 73 回応用物理学会学術講演会、2012/9/13、愛媛大学(愛媛県松山市).

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

坂田 肇 (SAKATA HAJIME)  
静岡大学・工学研究科・教授  
研究者番号：40377718