

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510172

研究課題名(和文) 複数の分光感度特性を有する画素を集積化した非冷却赤外線アレイセンサに関する研究

研究課題名(英文) Development of multicolor uncooled infrared array sensor

## 研究代表者

木股 雅章 (Kimata, Masafumi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：60388121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：複数の異なった分光感度特性を持った熱型赤外線検出器画素をアレイ状に配列した多波長非冷却赤外線アレイセンサの基礎技術の研究開発を行った。干渉吸収構造とプラズモニクス吸収構造で波長選択が実現できることを実験的に確認し、製造面と性能面から後者が有利であるとの結論を得た。プラズモニクス吸収構造を有する検出器で問題となった吸収帯域外感度が発生する原因を検討し、その抑制方法を提案するとともに、提案する方法が有効であることを実験的に確認した。さらに、プラズモニクス吸収構造の形状に非対称性を導入することで、偏光検知ができることも実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：We developed a basic technology for integrating pixels with different spectral responses on an infrared array sensor chip. Two types, an interference infrared absorber and plasmonic infrared absorber, were studied, and we have reached a conclusion that the plasmonic infrared absorber is superior from the viewpoint of productivity and performance. A problem of out-of-band sensitivity in the plasmonic infrared sensor has been solved by introducing a differential system with a reference pixel. We also showed that polarization-selective sensing is possible with an asymmetric plasmonics infrared absorber.

研究分野：赤外線検出器および赤外線イメージセンサ

キーワード：赤外線センサ MEMS 多波長

1. 研究開始当初の背景

本研究は、熱型赤外線検出器をアレイ状に配置した非冷却赤外線アレイセンサに関するものである。熱型赤外線検出器は、赤外線吸収構造と温度センサからなる検出器構造を、シリコン基板に形成した空洞上に保持した構造を有する光センサである。この構造で、赤外線を吸収して変化する検出器構造のわずかな温度変化を温度センサで計測することで赤外線を検出する。

これまで研究開発されてきた非冷却赤外線アレイセンサは、8~12 $\mu\text{m}$  (または8~14 $\mu\text{m}$ ) という大気窓に適合した波長域に感度を有するもので、可視光領域のセンシングに例えるとモノクロセンシングであった。赤外線センサの分光感度特性は、赤外線吸収構造の分光吸収特性によって決まる。可視光領域のセンシングで、カラー化が非常に有用であることに議論の余地はなく、赤外線領域においても可視光域のカラー化に相当する多波長化により得られる情報量が飛躍的に増大することが期待できる。これまで冷却が必要な量子型赤外線センサにおいて、半導体のバンドギャップを制御することで多波長化を行った開発例はあった。しかし、民生用途にも適用可能な非冷却赤外線アレイセンサでの多波長に関しては、複雑な構造のアイデアの提案があるのみで、実際にデバイスを実現した例は報告されていない。

2. 研究の目的

本研究では、最終的に1つの赤外線アレイセンサ上に、複数の分光感度特性を持った画素を配列した多波長非冷却赤外線アレイセンサを実現する基本技術を開発することを目指した。画素毎の分光感度特性の制御は、MEMSプロセスと互換性のある製造方法で作製する。

本研究の研究期間内に以下のことを明らかにすることを目標とした。

- (1) 赤外線吸収構造の吸収特性の制御を、MEMSプロセスと親和性の良い手法で実現できることを示す。
- (2) 上記赤外線吸収構造を、サーモパイル方式の非冷却赤外線センサ上に形成し、赤外線吸収構造の吸収特性を反映した分光感度特性が得られることを示す。
- (3) 複数の分光感度特性を有する赤外線吸収構造を同一チップ上に形成する製造技術を開発する。
- (4) (1)~(3)で得られた成果を基に、複数の異なった分光感度特性を有する画素を集積化した多波長非冷却赤外線アレイセンサを試作し、開発した技術の有用性を示す。

3. 研究の方法

本研究は、3つのステップで開発を進めた。すなわち、赤外線吸収構造の分光吸収特性を制御する技術を開発する第1ステッ

プ、この赤外線吸収構造をサーモパイル赤外線センサに適用して分光感度特性が制御できることを確認する第2ステップ、複数の異なった分光感度特性を有する画素を集積化した多波長非冷却赤外線アレイセンサを実現する第3ステップである。第1ステップでは、候補となり得る複数の技術の調査を行い、想定されるリスクに備えた。その上で、これまで蓄積してきたサーモパイル赤外線センサの設計、製造技術を生かして第2ステップ、第3ステップでの確実な目標達成を目指した。

4. 研究成果

(1) 干渉吸収構造による波長選択

現在、サーモパイル方式の非冷却赤外線アレイセンサには、LSIプロセスで用いられるシリコン酸化膜やシリコン窒化膜を組み合わせた赤外線吸収構造が用いられている。この種の赤外線吸収構造では、吸収特性は材料で決まってしまう、任意の特性を実現することはできない。

本研究では、図1に示すような干渉吸収構造を用いて吸収特性の制御を試みた。この干渉吸収構造では、赤外線は図の上方向から入射し、最下面のAlSi層で反射される。中間層であるTiNが赤外線吸収層となるが、CVD SiO<sub>2</sub>とPE SiNの層内の光路長が1/4波長になるとき最も大きな吸収が得られる。

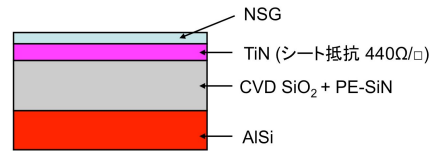


図1 干渉吸収構造

図2は、図1の構造でCVD SiO<sub>2</sub>/PE SiN層の膜厚を変化させた場合の吸収特性の赤外線吸収率測定結果である。図2(a)はTiNがない構造の吸収特性で、この場合、吸収構造を構成するSiO<sub>2</sub>とSiNで決まる8 $\mu\text{m}$ 以上の赤外線が吸収されていることが分かる。図2(b)~(d)はTiNを挿入して干渉吸収構造を形成した場合の結果である。

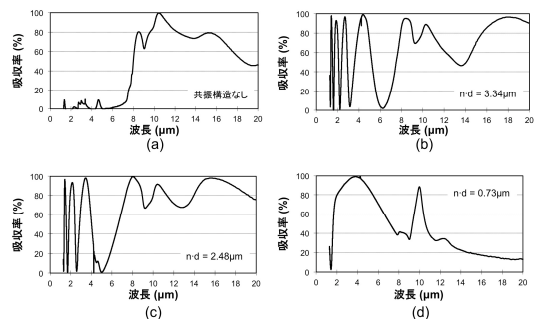


図2 干渉吸収構造の吸収特性

図中、n・d で示したのは、膜の屈折率 n と

厚さ  $d$  の積である。8  $\mu\text{m}$  以下の短波長側で干渉による吸収が見られ、層間膜の厚さを制御することで、短波長側の吸収ピークの位置を制御できることが確認できた。

(2) プラズモニクス吸収構造による波長選択

干渉吸収構造と同時にプラズモニクス吸収構造による波長選択の検討も行った。プラズモニクス吸収構造を持ったサーモパイル非冷却赤外線センサの画素を図3に示す。この構造は、サーモパイル赤外線センサの受光部に円筒状の凹構造を周期的に配列し、構造の最上面を金で覆ったもので、デバイス内で反射した光が受光部構造を形成している絶縁膜で吸収されないように裏面はアルミ薄膜で遮光している。

本研究では、図3の構造を用い、円筒状凹構造の周期を制御することで、3~10  $\mu\text{m}$  の広い波長範囲内の特定波長のみが高い感度を持った波長選択特性を得ることができることを確認した。結果を図4に示す。

図に示すように、円筒状凹構造周期と感度ピーク波長は一致しており、容易に分光感度特性を制御することができる。この方式では、比較的鋭い波長選択性が得られる上、1枚のマスクで画素毎に異なった周期を持った円筒状凹構造を作製することができるため多波長アレイセンサに適している。この方式で、異なった波長の画素を一つのチップ上に作製できることも確認している。そのため、本研究の2年目以降は、この構造に特化して研究開発を推進した。

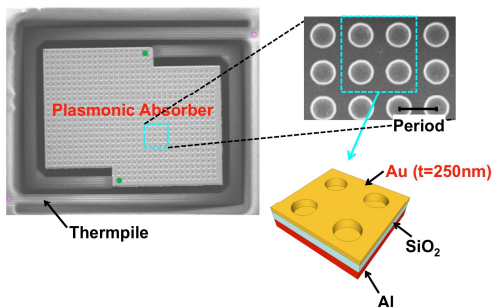


図3 プラズモニクス赤外線吸収構造を有したサーモパイル赤外線センサ

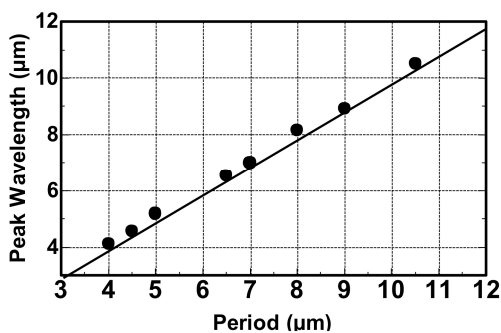


図4 プラズモニクス吸収構造有する赤外線センサの波長選択性

(3) プラズモニクス赤外線センサの吸収帯域外感度の抑制

(2)に示したように、円筒状凹構造を周期的に配列した構造で波長選択を実現することが可能であるが、(2)で行った実験は、受光部のみに赤外線が照射されるようにして行っていた。空間的な光の広がりを制限しない光源を用いて実験した場合、全ての光を反射し感度が無いはずの表面が金でプラズモニクス周期構造のない検出器でも図5に示すように8  $\mu\text{m}$  以上の波長域で大きな感度が観測され、実用上これが大きな問題になることが分かった。そのため、本研究では、吸収帯域外感度が発生する原因とその抑制方法について検討を行った。

図5に示した分光感度特性は、図2(a)の絶縁膜を吸収体に用いた検出器の分光感度特性に似ており、サーモパイルを構成する支持構造など絶縁膜がむき出しになっている箇所での吸収が寄与していると考えられた。そのため、図6に示すようにプラズモニクス吸収構造を有する検出器と、検出器としては同じ構造と形状を持ち、円筒状凹構造周期のない検出器の出力の差分をとることで吸収帯域外感度の抑制する差動検出方式を試みた。サーモパイルの場合、出力差は、それぞれの検出器のサーモパイルを逆極性に接続することで簡単に得ることができる。

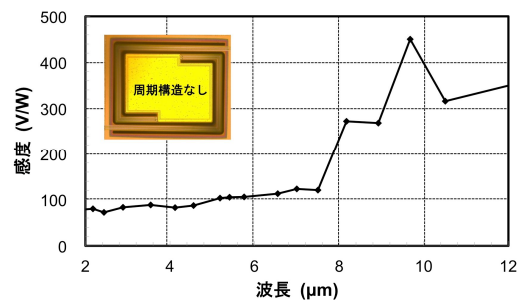


図5 空間的に広がりを持った光源で測定したプラズモニクス周期構造がない赤外線センサ光感度特性

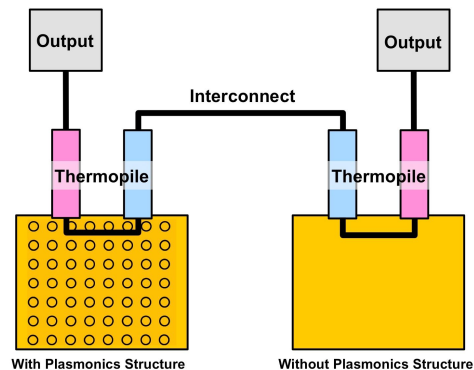


図6 プラズモニクス赤外線センサの吸収帯域外感度を抑制する差動検出方式

図7に差動検出方式で得られた周期  $5.5 \mu\text{m}$  の検出器の分光感度特性を示す。この結果が示すように、差動検出方式によって吸収帯域外感度を実用上問題ないレベルまで抑制することができた。

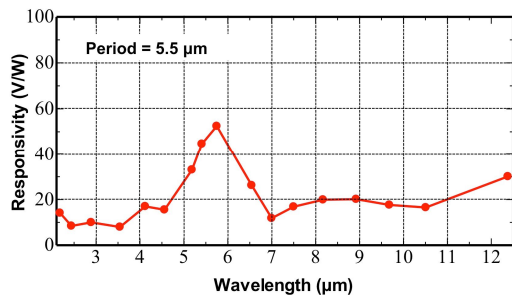


図7 差動検出方式によって得られたプラズモニクス赤外線センサ分光感度特性の例

#### (4) プラズモニクス吸収構造による偏光検知

本研究の中で、プラズモニクス吸収構造の形状に非対称性を導入することで、偏光検知が可能であることも実験的に確認することができた。図8に偏光検知の一例を示す。この実験では、凹構造を円筒ではなく楕円筒形状である。この場合、楕円の短軸と電界方向が平行な赤外線に対しては、円筒形状と同じように周期に対応した波長で大きな感度を有しているが、長軸に平行な電界成分を持った赤外線に対しては、全ての波長域でほとんど感度がなく、感度の偏光依存性が確認できた。

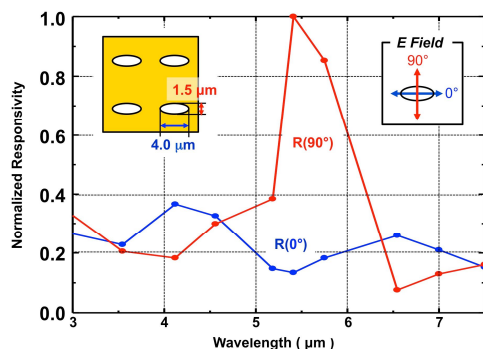


図8 プラズモニクス吸収構造を用いた赤外線センサによる偏光検知

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計16件)

著書名: Shinpei Ogawa, Daisuke Fujisawa, Hisatoshi Hata, Mitsuharu Uetsuki, Koji Misaki, and Masafumi Kimata、論文タイトル: Mushroom plasmonic metamaterial infrared absorbers、雑誌名: Applied Physics Letters、査読: 有、巻: 106、発行年: 2015、ページ: 0411051-0411054  
DOI: 10.1063/1.4906860

著書名: Shinpei Ogawa, Kyohei Masuda, Yousuke Takagawa, Masafumi Kimata、論文タイトル: Polarization-selective uncooled infrared sensor with asymmetric two dimensional plasmonic absorber、雑誌名: Optical Engineering、査読: 有、巻: 53、発行年: 2014、ページ: 1071101 - 1071105  
DOI: 10.1117/1.OE.53.10.107110

著書名: Kyohei Masuda, Shinpei Ogawa, Yousuke Takagawa, and Masafumi Kimata、論文タイトル: Optimization of two-dimensional plasmonic absorbers based on a metamaterial and cylindrical cavity model approach for high-responsivity wavelength-selective uncooled infrared sensors、雑誌名: Sensors and Materials、査読: 有、巻: 26、発行年: 2014、ページ: 215 - 223  
著書名: S. Ogawa, D. Fujisawa, T. Maegawa, M. Ueno, and M. Kimata、論文タイトル: Three-dimensional plasmonic metamaterial absorbers for high-performance wavelength selective uncooled infrared sensors、雑誌名: Proceedings of SPIE、査読: 無、巻: 9070、発行年: 2014、ページ: 90701Y1-90701Y8  
DOI: 10.1117/12.2049895

著書名: Shinpei Ogawa, Kyohei Masuda, Yousuke Takagawa, and Masafumi Kimata、論文タイトル: Polarization selective uncooled infrared sensor using an asymmetric two-dimensional plasmonic absorber、雑誌名: Proceedings of SPIE、査読: 無、巻: 9070、発行年: 2014、ページ: 90701T1-90701T8  
DOI: 10.1117/12.2049677

著書名: Shinpei Ogawa, Junya Komoda, Kyohei Masuda, and Masafumi Kimata、論文タイトル: Wavelength selective wideband uncooled infrared sensor using a two-dimensional plasmonic absorber、雑誌名: Optical Engineering、査読: 有、巻: 52、発行年: 2013、ページ: 1271041 - 1271045  
DOI: 10.1117/1.OE.52.12.127104

著書名: Masafumi Kimata、論文タイトル: Trends in small-format infrared array sensors、雑誌名: Proceedings of IEEE Sensors 2013、査読: 無、発行年: 2013、ページ: 1456 - 1459 [INVITED]

著書名: Shinpei Ogawa, Junya Komoda, Kyohei Masuda, Yousuke Takagawa and Masafumi Kimata、論文タイトル: Wavelength selective uncooled infrared sensor using triangular-lattice plasmonic absorbers、雑誌名: Proceedings of Optical MEMS and Nanophotonics 2013、

査読：無、発行年：2013、ページ：61 - 62  
著書名：Masafumi Kimata、論文標題：  
MEMS-based Uncooled Infrared Sensors、  
雑誌名：Proceedings of The  
International Display Workshops、査  
読：無、巻：19、発行年：2012、ページ：  
1411-1414

[学会発表](計 38 件)

発表者名：Daisuke Fujisawa, Shinpei Ogawa, Hisatoshi Hata, Mitsuharu Uetsuki, Koji Misaki, Yousuke Takagawa, and Masafumi Kimata、発表標題：  
Multi-color imaging with silicon-on-insulator diode uncooled infrared focal plane array using through-hole plasmonic metamaterial absorbers、学会名等：The 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems、発表年月日：2015年1月21日、発表場所：エストリル(ポルトガル)

発表者名：木股雅章、発表標題：非冷却赤外線イメージセンサと自動車応用、学会名等：第30回ポリマー光部品(POC)研究会、発表年月日：2014年11月19日、発表場所：産業技術総合研究所関西センター(大阪府池田市)

発表者名：小川新平, 藤澤大介, 秦久敏, 植月満治, 三崎浩司, 木股雅章、発表標題：高機能非冷却赤外線センサの高性能化I: 3次元プラズモニクメタマテリアル吸収体の基礎検討、学会名等：第75回応用物理学会秋季学術講演会、発表年月日：2014年9月18日、発表場所：北海道大学(北海道札幌)

発表者名：藤澤大介, 小川新平, 秦久敏, 植月満治, 三崎浩司, 木股雅章、発表標題：高機能非冷却赤外線センサの高性能化: 3次元プラズモニクメタマテリアル吸収体の光学特性、学会名等：第75回応用物理学会秋季学術講演会、発表年月日：2014年9月18日、発表場所：北海道大学(北海道札幌)

発表者名：高川陽輔, 小川新平, 増田恭平, 宮下晃一, 木股雅章、発表標題：1次元プラズモニクメタマテリアルによる偏光75回応用物理学会秋季学術講演会、発表年月日：2014年9月18日、発表場所：北海道大学(北海道札幌)

発表者名：木股雅章、発表標題：赤外線イメージングとその応用、学会名等：日本光学会光設計研究グループ 第54回研究会、発表年月日：2014年7月25日、発表場所：宇都宮大学 オプティクス教育研究センター(栃木県宇都宮市) [招待講演]

発表者名：木股雅章、発表標題：赤外線センサ、学会名等：半導体・集積回路技術第78回シンポジウム、発表年月日：2014

年7月18日、発表場所：東京理科大学森戸記念館(東京都) [招待講演]

発表者名：Shinpei Ogawa, Kyohei Masuda, Yousuke Takagawa, and Masafumi Kimata、発表標題：Polarization selective uncooled infrared sensor using an asymmetric two-dimensional plasmonic absorber、学会名等：SPIE DSS (Defense, Security and Sensing)、発表年月日：2014年5月7日、発表場所：ボルチモア(米国)

発表者名：S. Ogawa, D. Fujisawa, T. Maegawa, M. Ueno, and M. Kimata、発表標題：Three-dimensional plasmonic absorber based on microdisk resonators for high performance wavelength selective uncooled infrared sensors、SPIE DSS (Defense, Security and Sensing)、発表年月日：2014年5月6日、発表場所：ボルチモア(米国)

発表者名：増田恭平, 小川新平, 高川陽輔, 宮下晃一, 木股雅章、発表標題：プラズモニクメタマテリアルによる非冷却赤外線センサの新機能 -非対称性による偏光検知-、学会名等：第62回応用物理学会春季学術講演会、発表年月日：2014年3月18日、発表場所：青山学院大学相模原キャンパス(神奈川県相模原市)

発表者名：木股雅章、発表標題：赤外線センサ技術の現状と今後の展開、学会名等：第61回応用物理学会春季学術講演会、発表年月日：2014年3月17日、発表場所：青山学院大学相模原キャンパス(神奈川県相模原市) [招待講演]

発表者名：Masafumi Kimata、発表標題：Trends in small-format infrared array sensors、学会名等：IEEE Sensors 2013、発表年月日：2013年11月6日、発表場所：ボルチモア(米国) [招待講演]

発表者名：増田恭平, 高川陽輔, 小川新平, 木股雅章、発表標題：非対称形状を導入したプラズモニクメタマテリアルによる偏光検知非冷却赤外線センサ、学会名等：第74回応用物理学会秋季学術講演会、発表年月日：2013年9月19日、発表場所：同志社大学(京都府)

発表者名：高川陽輔, 増田恭平, 小川新平, 木股雅章、発表標題：非対称周期構造を導入したプラズモニクメタマテリアルによる多波長選択型非冷却赤外線センサ、学会名等：第74回応用物理学会秋季学術講演会、発表年月日：2013年9月19日、発表場所：同志社大学(京都府)

発表者名：Shinpei Ogawa, Junya Komoda, Kyohei Masuda, Yousuke Takagawa and Masafumi Kimata、発表標題：Wavelength selective uncooled infrared sensor using triangular-lattice plasmonic absorbers、学会名等：Optical MEMS and Nonophotonics 2013、発表年月日：2013

年8月20日、発表場所：金沢市文化ホール（石川県）

発表者名：Shinpei Ogawa, Junya Komoda, Kyohei Masuda, and Masafumi Kimata、発表タイトル：Wavelength selective wideband uncooled infrared sensor by two-dimensional plasmonic absorber、学会名等：SPIE DSS (Defense, Security and Sensing)、発表年月日：2013年5月1日、発表場所：ボルチモア（米国）

発表者名：高川陽輔、菰田潤哉、増田恭平、坂田浩太郎、小川新平、木股雅章、発表タイトル：プラズモニクス吸収体による波長選択型赤外線センサ -表面格子形状の検討-、学会名等：第60回応用物理学関係連合講演会、発表年月日：2013年3月29日、発表場所：神奈川工科大学（神奈川県）

発表者名：Masafumi Kimata、発表タイトル：MEMS-based uncooled infrared sensors、学会名等：The 19th International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2012、発表年月日：2012年12月6日、発表場所：国立京都国際会館（京都府）

発表者名：増田恭平、菰田潤哉、福島直樹、小川新平、木股雅章、発表タイトル：プラズモニクス吸収体による波長選択型非冷却赤外線センサ 表面構造の最適化、学会名等：第73回応用物理学学会学術講演会、発表年月日：2012年9月13日、発表場所：愛媛大学 / 松山大学（愛媛県）

発表者名：菰田潤哉、増田恭平、福島直樹、小川新平、木股雅章、発表タイトル：プラズモニクス吸収体による中・遠赤外域多波長検知非冷却赤外線センサ、学会名等：第73回応用物理学学会学術講演会、発表年月日：2012年9月13日、発表場所：愛媛大学 / 松山大学（愛媛県）

#### 〔図書〕(計1件)

著者名：石井明、金子透、木股雅章、出版社名：株式会社コロナ社、書名：メカトロニクス計測の基礎、発行年：2014年、ページ：24 - 78

#### 〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

取得状況（計4件）

名称：マイクロ真空計

発明者：木股雅章

権利者：学校法人 立命館

種類：特許

番号：5002861

登録年月日：2012年6月1日

国内外の別：国内

名称：マイクロ真空計

発明者：木股雅章

権利者：学校法人 立命館

種類：特許

番号：8,258,509

登録年月日：2012年9月4日

国内外の別：国外

名称：赤外線アレイセンサ

発明者：木股雅章

権利者：学校法人 立命館

種類：特許

番号：5396617

登録年月日：2013年11月1日

国内外の別：国内

名称：赤外線アレイセンサ

発明者：木股雅章

権利者：学校法人 立命館

種類：特許

番号：7,728,297

登録年月日：2010年6月1日

国内外の別：国外

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

木股 雅章 (KIMATA MASAFUMI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：60388121