

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月1日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360004

研究課題名（和文） {311}欠陥量子細線ロッド電子系の発光特性を利用したシリコン光増幅器の研究

研究課題名（英文） Development of Silicon-Optical-Amplifier Based on Radiative Recombination in the Quantum Rod-like Electronic System Associated with {311}-Defects

研究代表者

深津 晋 (FUKATSU SUSUMU)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：60199164

研究成果の概要（和文）：シリコン結晶内に発生する{311}ロッド状欠陥は、天然の量子細線ともよべる低次元電子系を伴う。本研究では、この欠陥の特異性を利用してシリコン生来の間接遷移特性を克服し、導波路型シリコンLEDから極低温で動作するシリコン光増幅器実現への道筋をつけた。「制御された欠陥」を発光中心とする光能動デバイスを実現すべく、(1)形成素過程に踏み込んだ欠陥発生制御とLED発光効率を指標とした導波路への精密欠陥導入、(2)電流駆動光増幅の実証、(3)利得発生に有利な局在電子系の同定と分離・抽出、(4)導波路LEDの室温動作と30MHz直接変調を行い、{311}欠陥量子細線ロッドの光学的な有用性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：An attempt was made to create a waveguide silicon(Si)-LED and a Si-optical-amplifier operable at cryogenic temperature by making most of the unique electronic properties of quantum wire-like {311}-rod-defects developing in crystalline Si that help break the inherent indirect bottleneck. To create Si-based active photonic devices based on such “tamable defects”, we have demonstrated (1) on-demand position-selective creation of defects, (2) silicon-optical-amplifier under current injection, (3) identification and utilization of a new gain-boosting localized electronic system, and (4) a waveguide-LED with a 30-MHz modulation bandwidth operated at room temperature.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2011年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2012年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物性・結晶工学

キーワード：シリコン光増幅器・{311}欠陥・量子細線ロッド電子系・間接遷移の克服

## 1. 研究開始当初の背景

シリコンにおける光発生の試みが前世紀から続けられてきた。シリコン製の高輝度光源が実現されることは、ポストCMOS、光電子集積へのマイルストーンのみならず、現代版産業革命に匹敵する波及効果をもたらす。一方、技術ただ乗り論からの脱却、持続可能社会実現の上でも国益に叶うものといえる。その本質は、シリコン生来の間接光学遷移特

性の克服にあるが、これは物質科学の最終問題のひとつに数えられる難問であった。

代表者らは、高歪ヘテロ界面における近接効果を研究する過程で、偶然に天然の量子細線であるロッド状{311}欠陥の蛍光線に光利得を見いだした。{311}欠陥は方位が固定されるため空間配置を通じて発光機能が制御できる可能性があり、シリコン光増幅器の具体的なデザインを議論できる状況が整った。

## 2. 研究の目的

完成された CMOS テクノロジーの限界を補完・打破する試みとしてオンチップ光電子融合、シリコンフォトニクスに期待が集まっている。中でも通信波長適合のシリコンベース光増幅器・レーザの実現が渴望されてきた。長年の研究からシリコンの光・利得発生には間接バンド端に帰属し得ない特異な電子状態が有効なことが知られており、非バンド状態制御のための方法論が模索されてきた。

実空間上で局在し、非ブロッホ的な性質を示す結晶欠陥は、間接バンド間遷移攻略にむけた最有力の候補である。本研究では、天然の量子細線である{311}ロッド状欠陥にともなう低次元電子系を駆逐することで、シリコン近縁構造の間接バンド間遷移では実現不能な「光増幅」を達成し、Si 製 SOA 実現への道筋をつけることを目指した。

まず、シリコン導波路構造で動作可能な LED (Si-LED)の実現の試みからスタートし、利得の精密評価を通じて電流駆動可能なシリコン光増幅器(Si-(S)OA)への進化を模索することが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

シリコン{311}欠陥量子細線ロッド電子系を活性領域とするシリコン光増幅器の実証を目的として、以下の手順にしたがって系統的な構造制御と光学評価実験を行った。

### (1){311}欠陥導入制御法の確立

- i Si 低温エピタキシ SOI ベース構造の作製
- ii 段階アニール(300→600~900 °C)による{311}欠陥量子細線ロッドの導入

### (2){311}欠陥量子細線ロッドの発光効率・光利得の評価

- i 光励起・電流励起による発光評価
- ii 2チップ構成オンオフ光利得評価
- iii 光利得評価法の検討
  - ・可変長ストライプ法と見かけの利得上昇。
  - ・点状励起・積分法による損失分離評価
  - ・ポンプ・プローブ法との比較検討。

### (3)量子細線ロッド3,4準位電子系の弁別

- i 発光強度・利得の温度変化、プローブ光・ポンプ光強度依存性
- ii キャリアダイナミクスの評価

### (4)高温動作の検証

## 4. 研究成果

{311}欠陥導入制御法の確立を試み、光利得評価法の整備を行った。まず、SOI 導波路基板への段階的アニール(300°C(真空中:150時間)→600~900°C(窒素雰囲気:30分))による{311}欠陥量子細線ロッド導入の様子を系統的に調べた。雰囲気、温度、時間の関数として欠陥密度を調べ、細線構造と基板との方位関係を電子顕微鏡で同定した。また III-V 族量子ドット(GaSb, InSb)シリコン埋め込み構

造を導入し、高温アニール(700°C以上)において量子ドットの熱解離をとともなう{311}欠陥導入を並行して試みた。図1に示すように{311}欠陥量子細線ロッド由来発光(1377 nm, 900 meV)の発光強度は700°Cのアニール試料において支配的となり、{311}欠陥が効率的に導入されていることがわかる。

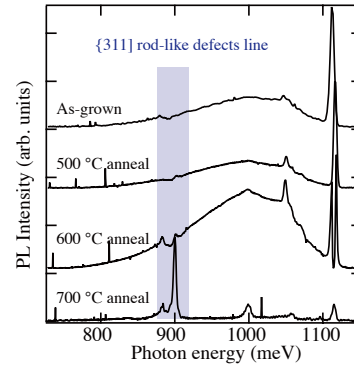


図1 InSb 量子ドット埋め込み Si 構造における発光スペクトルのアニール温度依存性。

構造評価と並行して発光強度・利得の温度変化、プローブ光・ポンプ光強度依存性、励起長・励起波長依存性を調べ、反転分布に寄与する量子細線ロッドマルチ準位電子系の弁別を試みた(図2)。2チップ構成のポンプ・プローブ法(図2(a))を用い、プローブ光を光励起、増幅器を電流励起した条件下での光増幅の評価を極低温( $\approx 10$  K)で行った。5mm 長の増幅器では、全光ポンプ下の On-Off 利得

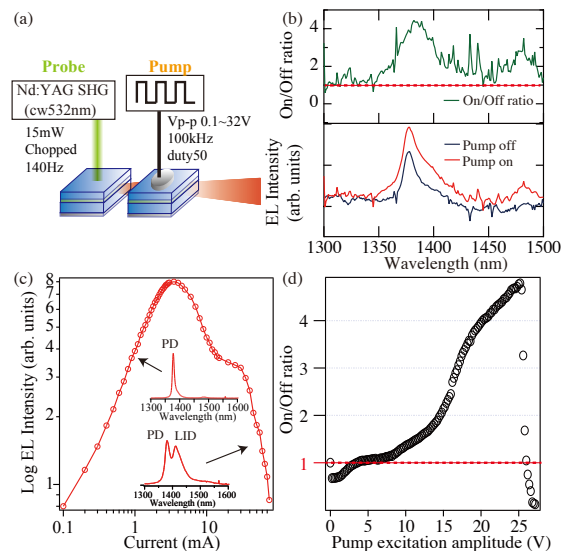


図2 (a)ポンプ・プローブ法による光利得測定配置。(b){311}欠陥量子細線ロッド試料のポンプ・プローブ測定結果。(c)電流注入発光(エレクトロルミネッセンス:EL)の電流依存性。挿入図は10mAと90mA注入時におけるスペクトル。(d)On-Off 光利得の注入電圧依存性

が 6 dB に留まるのに対し、電流励起では 7-8dB の増幅度が得られた(図 2(b))。また、{311}欠陥量子細線ロッド構造の幾何学配置に応じて分類されるスペクトル的に近接した 2 本の蛍光線(planar defects: PD@1377nm, line-interstitial defects: LID@1405nm)を励起強度依存性を利用してスペクトル上で分離することができた(図 2(c))。光利得は意外にも高エネルギー側の PD についてのみ生じ、PD のみが活性となる領域(<25V)では励起強度に比例する光利得が、一方、低エネルギー側の LID が活性となる励起領域(>25V)では光利得の急激な減少から損失へと、急激な質的転換が発生する様子が観測された(図 2(d))。

この結果を受け、{311}電子系にともなう光利得発生のダイナミクスを高スペクトル分解能の電流注入ポンプ・プローブ計測によって調べた。PD・LID 両系の蛍光発生を時間-発光波長ドメイン 2 次元マップの上で細大漏らさず追跡することにより PD と LID の完全単離に成功した(図 3)。LID の発光立ち上がり減衰時定数は、ともに温度上昇にともなって急激な減少を示す一方、PD よりも 2 ケタ程度小さい値に留まることは、散逸機構の介在により励起直後に LID の利得抑圧が発生すること示唆している。これらを敷衍すれば、{311}欠陥量子細線ロッド電子系を活性領域にもつ光利得器・シリコンレーザを実現するには、PD の選択的導入と LID の実効的な抑制が重要なことがわかる。一方、光励起下では、レーザ発振に直結すべき、増幅自然発光発生を示唆する測定結果を得た。

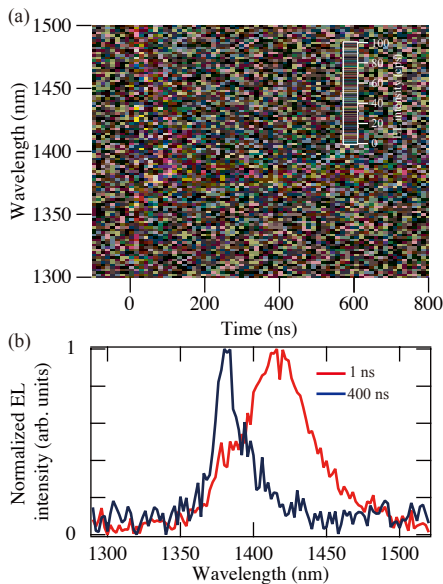


図 3 (a){311}欠陥導入試料の時間分解エレクトロルミネッセンスの時間-スペクトル 2 次元マッピング。(b) 時間分解 EL のスナップショットスペクトル。赤線はパルス電流励起から 1ns 後、青線は 400ns 後のスペクトル。

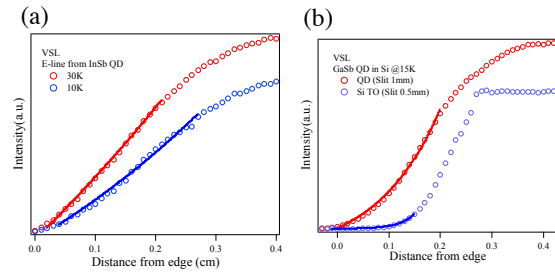


図 4 可変ストライプ長法による光利得評価。(a){311}欠陥量子細線ロッドの発光強度励起長依存性。(b)GaSb 量子ドットと Si<sub>TO</sub> 発光強度の励起長依存性。高 N.A.集光系による迷光の利得過大評価によって無利得の Si<sub>TO</sub> 発光に「見かけの光利得」が生じる様子がわかる。

次いで、光利得定量化の精度向上を試みた。誤同定を完全に排除するため増幅器配置の単一パス評価と単一チップの可変長ストライプ励起法を比較した(図 4)。後者が励起密度が非一様、高 N.A.集光系で迷光が見かけ利得を生じる点に鑑み、導波路設計の指針を得た。有効な対策として点状励起・積分法つまり励起長をゼロにして増幅を抑制することで損失分だけを分離評価することを検討した。

一方、光能動デバイスを指向する上では、室温動作が必須である。そこで室温観測を試みたところ(図 5)光励起・電流注入下ともに{311}欠陥量子細線ロッド電子系起源の蛍光を確認するとともに  $\approx 30\text{ns}$  程度の NRZ の EL 直接変調を検証できた。これは当初計画の Si-LED の達成を意味し、100K 以上で消光してしまう他のシリコン点欠陥に対する{311}欠陥の優位性を示している。過去に利得発生が報告された G-line 欠陥の高効率導入法を新規に開発し、低温での利得を調べたが、レーザ発振らしき振る舞いは再現せず、利得も発生しないことが判明した。室温利得こそ検証が完了していないものの、これらの事実は{311}欠陥の優位性を示していると言える。

さらに発展研究として SiGe 混晶、直接端発光の利用が期待される Ge への拡張を検討した。高密度励起下での Auger 散逸、欠陥エミュレーション機能、直接端励起法などに関する新たな知見を得ることができた。

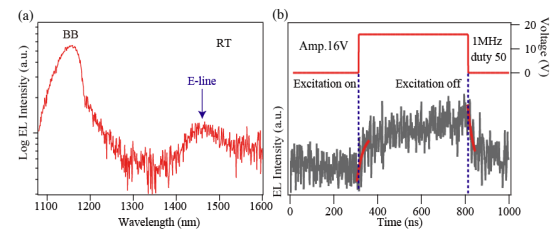


図 5 (a)室温動作{311}欠陥由来蛍光線。(b) {311}欠陥由来蛍光の室温パルス変調。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件) 全て査読有

- 1) Y. Kohmura, K.Sawada, S.Fukatsu, and T. Ishikawa, “Controlling the Propagation of X-ray Waves inside a Heteroepitaxial Crystal Containing Quantum Dots Using Berry’s Phase”, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 057402 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.057402
- 2) Y. Terada, Y.Yasutake, and S.Fukatsu, “Time-resolved electroluminescence of bulk Ge at room temperature”, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 041102-0-3 (2013). DOI: 10.1063/1.4789511
- 3) K.Murata, S.Fukatsu(7), K.Miki, “Characterization of Highly Concentrated Bi Donors Wire- $\delta$ -Doped in Si”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, 11PE05-11PE05-4 (2012). DOI: 10.1143/JJAP.51.11PE05
- 4) T.Tayagaki, K.Ueda, S.Fukatsu, Y.Kanemitsu, “Recombination Dynamics of High-Density Photocarriers in Type-II Ge/Si Quantum Dots”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **81**, 064712-064712-6 (2012). DOI: 10.1143/JPSJ.81.064712
- 5) Y.Terada, Y.Yasutake, S.Fukatsu, “An artificial nonradiative recombination center model created by use of a Si1-xGex/Si quantum-well-inserted pseudomorphic superlattice”, *Thin Solid Films* **520**, 3365-3368 (2012). DOI: 10.1016/j.tsf.2011.08.033.
- 6) K.Ueda, T.Tayagaki, S.Fukatsu, Y.Kanemitsu, “High-density carrier dynamics in Ge/Si quantum dots studied by time-resolved photoluminescence spectroscopy”, *J. Non-Cryst. Solids* **358**, 2122-2125 (2012). DOI: 10.1016/j.jnoncrsol.2011.12.020
- 7) K.Murata, Y.Yasutake, S.Fukatsu(4), K.Miki, “High-density G-centers, light-emitting point defects in silicon crystal”, *AIP Advances* **1**, 032125 (2011). DOI: 10.1063/1.3624905
- 8) T.Tayagaki, S.Fukatsu, Y.Kanemitsu, “Auger Recombination Rate in Si1-xGex/Si Heterostructures”, *phys. stat. sol. (c)* **8**, 1049-1054 (2011). DOI: 10.1002/pssc.201000382
- 9) K.Murata, S.Fukatsu(5), K.Miki, “Hybrid Laser Activation of Highly Concentrated Bi Donors in Wire- $\delta$ -Doped Silicon”, *Applied Physics Express* **3**, 061302-1-3 (2010). DOI: 10.1143/APEX.3.061302
- 10) N. Tana-ami, S.Fukatsu(5), “A MHz Modulable Si-based LED Afforded by Engineering Light-emitting Defects in Si”, *Mater. Res. Soc. Proc.* **1195**, B03-03-1-5 (2010).
- 11) T.Tayagaki, S.Fukatsu, Y.Kanemitsu, “Control of Auger Recombination Rate in Si1-xGex/Si Heterostructures”, *J. Phys. Soc. Jpn.*

**71**, 031701-1-4 (2010).

DOI: 10.1143/JPSJ.79.013701

[学会発表] (計 29 件)

- 1) 大村史倫, 深津 晋(5), “高濃度G-center導入Siの蛍光の動的挙動”, 第60回応用物理学会春季学術講演会 29p-B4-12 2013.3.29 神奈川工大.
- 2) 寺田陽祐, 安武裕輔, 深津 晋, “バルクGeの直接遷移ELと間接遷移ELの直流電場による分離”, 第60回応用物理学会春季学術講演会 28p-G5-6 2013.3.28 神奈川工大.
- 3) 安武裕輔, 深津 晋, “伸張歪Ge-on-Siへの室温光スピン注入”, 第60回応用物理学会春季学術講演会 28a-A8-11 2013.3.28 神奈川工大.
- 4) 林修平, 安武裕輔, 深津 晋, “Geの直接遷移蛍光の円偏光度の温度・励起エネルギー依存性”, 第60回応用物理学会春季学術講演会 28a-A8-10 2013.3.28 神奈川工大.
- 5) Y.Yasutake, S.Hayashi, and S.Fukatsu, “Observation of Oscillatory Magneto-photoluminescence of Direct Transition in Ge at Room Temperature”, 2012 Materials Research Society Fall Meeting, DD8.02 2012.11.27 Boston, USA.
- 6) Y.Terada, Y.Yasutake, and S.Fukatsu, “Electroluminescence Transient of Bulk-Ge Light Emitting Device”, 2012 Materials Research Society Fall Meeting, DD8.03 2012.11.27 Boston, USA.
- 7) T. Tayagaki, S.Fukatsu(3), Y.Kanemitsu, “Auger Recombination Dynamics in Type-II Ge/Si Quantum Dots and Its Application for Photovoltaic Devices”, 2012 Materials Research Society Fall Meeting, DD13.02 2012.11.27 Boston, USA.
- 8) F.Omura, Y.Yasutake, and S.Fukatsu, “Spectral Modulation of Photoluminescence in a Nonspecular Fabry-Perot Silicon Cavity”, 2012 Materials Research Society Fall Meeting, DD15.03 2012.11.27 Boston, USA.
- 9) 寺田陽祐, 安武裕輔, 深津 晋, “Bulk-Geの速いEL応答”, 第73回応用物理学会学術講演会 13p-F1-10 2012.9.13 愛媛大学・松山大学.
- 10) 村田晃一, 深津 晋(5), 三木一司, “Si(211)基板上へのBiドーピング層成長”, 第73回応用物理学会学術講演会 11a-F8-2 2012.9.11. 愛媛大学・松山大学.
- 11) 村田晃一, 深津 晋(5), 三木一司, “Si結晶中のBi & Er 重畳 $\delta$ ドーピング層のハイブリッドレーザアニール活性化”, 第73回応用物理学会学術講演会 11p-F5-3 2012.9.11. 愛媛大学・松山大学.
- 12) 安武裕輔, 深津 晋, “磁場円偏光 PL による Ge 直接遷移端の Landau 準位観察”, 第73回応用物理学会学術講演会 11p-PA4-8 2012.9.11. 愛媛大学・松山大学.

- 13) 安武裕輔, 深津 晋, “Geへの光スピン注入の温度依存性”, 第59回応用物理学関係連合講演会 16p-B11-2 2012.3.16 早稲田大学.
- 14) 大村史倫, 深津 晋, “非鏡面ファブリペロ干渉による蛍光スペクトル変調”, 第59回応用物理学関係連合講演会 16p-GP6-11 2012.3.16 早稲田大学.
- 15) 村田晃一, 深津 晋(5), 三木一司, “Si結晶中の高濃度 $\delta$ ドーピング層Bi不純物のレーザーアニール法を用いた光学的・電気的活性化”, 第59回応用物理学関係連合講演会 15p-E1-4 2012.3.15 早稲田大学.
- 16) 村田晃一, 深津 晋(4), 三木一司, “シリコン結晶中の点欠陥; 高濃度G-center ドーピング法”, 第72回応用物理学学会学術講演会 1p-ZL-6 2011.9.1 山形大学.
- 17) 村田晃一, 深津 晋(5), 三木一司, “Si結晶中のBi:Er重畳 $\delta$ ドーピング層のハイブリッドレーザーアニール活性化”, 第72回応用物理学学会学術講演会 1a-M-3 2011.9.1 山形大学.
- 18) 田名網宣成, 深津 晋, “シリコン導波路における1軸性歪によるラマン増幅の偏波依存性の変化”, 第72回応用物理学学会学術講演会 1p-ZL-5 2011.9.1 山形大学.
- 19) 安武裕輔, 深津 晋, “発光欠陥を有するInSb QDs埋め込みSi構造における光利得のポストアニール依存性”, 第72回応用物理学学会学術講演会 31p-P6-8 2011.8.31. 山形大学.
- 20) Y.Yasutake, S.Fukatsu(7), “Optical gain on {311} rod-like defects in silicon”, Material Research Society 2010 Fall Meeting, Symposium AA 5.2 2010.11.30 Boston, USA.
- 21) T.Tayagaki, S.Fukatsu, Y.Kanemitsu, “Relaxation of Hot Carriers in Ge/Si Quantum Dots”, Material Research Society 2010 Fall Meeting, Symposium AA 16.4, 2010.12.2 Boston, USA.
- 22) 安武裕輔, 深津 晋(5), “シリコン結晶欠陥の光利得”, 第71回応用物理学学会学術講演会 17a-H-6 2010.9.17 長崎大.
- 23) 村田晃一, 深津 晋(5), “シリコン結晶中の高濃度ビスマス不純物準位からのフォトルミネセンス”, 第71回応用物理学学会学術講演会 17a-H-7 2010.9.17 長崎大.
- 24) 上田 慧, 深津 晋(4), “Ge/Si量子ドットの光学特性とアニーリング効果”, 第71回応用物理学学会学術講演会 17a-NB-9 2010.9.17 長崎大.
- 25) 田名網宣成, 深津 晋, “シリコン導波路におけるカスケードラマン増幅の結晶方位異方性”, 第71回応用物理学学会学術講演会 17a-H-6 2010.9.17 長崎大.
- 26) 寺田陽祐, 深津 晋(4), “歪超格子障壁の挿入に起因するSi $_{1-x}$ Gex/Si歪量子井戸の特異な励起強度依存性”, 第71回応用物理学学会学術講演会 16a-NC-4 2010.9.16 長崎大.
- 27) 村田晃一, 深津 晋(4), “シリコン結晶中

の高濃度 $\delta$ ドーピング層ビスマス不純物のハイブリッドレーザーアニール法による活性化”, 第71回応用物理学学会学術講演会 16a-ZD-7 2010.9.16 長崎大.

28) 太野垣健, 深津 晋, 金光義彦, “Ge/Si量子ドットにおける高密度励起ダイナミクス”, 第71回応用物理学学会学術講演会 14a-NC-2 2010.9.14 長崎大.

29) T.Tayagaki, S.Fukatsu, Y.Kanemitsu, “Well-width dependence of Auger recombination rate in Si $_{1-x}$ Gex/Si single quantum wells under high-density photoexcitation”, European Material Research Society 2010 Spring Meeting, J-10-1, 2010.7.1, Strasbourg, France.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

URL: <http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~fukatsu/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

深津 晋 (FUKATSU SUSUMU)  
東京大学・大学院総合文化研究科・教授  
研究者番号: 60199164

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者

安武 裕輔 (YASUTAKE YUHSUKE)  
東京大学・大学院総合文化研究科・助教  
研究者番号: 10526726