

令和元年6月13日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06471

研究課題名(和文) ボルト締結した炭素繊維強化複合材料の耐久性の改善と設計規準の確立

研究課題名(英文) Design Criterion and Improvement of Durability of Carbon Fiber Reinforced Composites Fastened by Bolt

研究代表者

大窪 和也 (OKUBO, Kazuya)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：60319465

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：CFRP(炭素繊維強化プラスチック)材を汎用ボルトを用いて金属部材と締結する場合の疲労現象を考慮した設計規準を社会に提唱すると共に、そのボルト締結部での構造変化をもたらすような新しい方法を開発する事を目的とした。

研究計画に従い、締結部のマクロな特性変化や力学的な留意点を明確化したうえで、微細ガラス繊維を母材に添加しておく手法や、改質弾性カラーの併用効果を明らかにした。またエネルギー解放率を用いて継手強度の違いをより明瞭に記述できる設計規準を提唱したうえで、疲労耐久性の改善のための独自の手法として、いわゆるバイトプレートと微繊維添加樹脂フィルムを併用する新締結手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般用途だけではなく、長期間の実働荷重を受ける構造用途に用いられるCFRP(炭素繊維強化プラスチック)材を汎用ボルトを用いて金属部材と締結する場合の、疲労現象を考慮した設計規準を社会に提唱すると共に、その疲労耐久性を高めるためにボルト締結部での構造変化をもたらすような新しい施工方法を開発し、CFRP材を実際に広く平易に利用できる技術環境を提供する事を目的として研究を行った。

この新構造の採用により疲労耐久性が改善できる事も明らかにすると共に、ボルト締結部での設計手法や構造の変化をもたらすような新しい施工方法を開発した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of study is to develop novel technique to modify the designing aspect for mechanical joint of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) and metal plate fastened with conventional bolt, and also to propose a design criterion of the joint considering the durability under cyclic fatigue loading.

According to the plan, at first, changes of mechanical properties of the conventional joint and its points to be considered was clearly shown to start the study. Then, effects of novel techniques were experimentally shown, where micro-sized glass fibers were previously added into the matrix of jointed CFRP and the modified collar surrounding the bolt. The design criterion was proposed to explain the change of strength of the joint considering the theory of energy release rate with damage propagation around the bolt hole. At last, an original novel technique where the byte plate and modified resin film was applied around the bolt hole was developed to improve the fatigue durability.

研究分野：材料力学，破壊力学，複合材料工学

キーワード：複合材料 締結 ボルト 微細ガラス繊維 締結力 継手効率 疲労寿命 エネルギー解放率

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維(Carbon Fibers)の価格が廉価になり、CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics: 炭素繊維強化プラスチック)が広く多様な分野で使用されるようになった。例えば高価な航空機用や自動車用材料だけではなく、一般向けの構造部材やスポーツ用具、レジャー用品などにもCFRPは汎用的に使われている。このような状況を踏まえて提出者は連名者と共に、数多くのCFRP材の強度や疲労特性の改善に関する研究を行って来た。しかしその研究対象はCFRP材自体の特性改善につながる研究内容であり、CFRPが一般用途のための構造部材としても広く使われるようになったまさに今、主要部品、すなわち骨格フレームの部分やエンジンなどの主要機械部品などの鋼やアルミなどの金属部材に接合する汎用的な設計はこれからの実用利用を考えると避けては通れない(図1参照)。

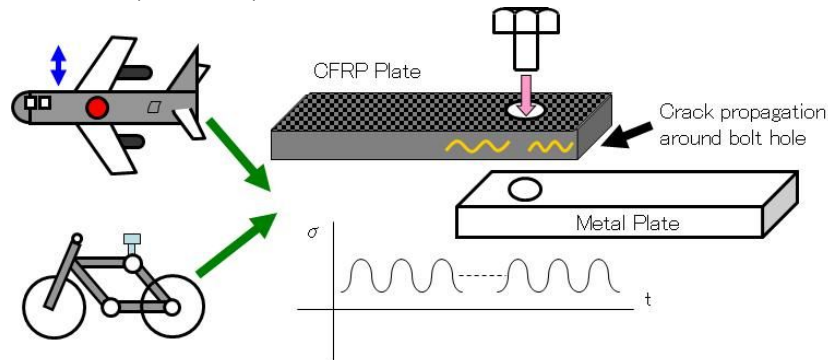


図1 炭素繊維強化複合材料(CFRP)材を締結する必要性とその問題点

これまでCFRP材と金属部分とを連結または接合するためには、既存の技術であるボルト締結や接着接合を併用するような事が行われている。このような締結法には、金属間を接合する場合とは異なる設計上の不確定要因があり、それを回避または保障するために過剰な余裕を見た締結設計が成されているのが実態である。例えばCFRP材と金属部分を締結するためには、従来の金属部材設計の際よりもボルト本数を増やしたり、CFRP材に設けた円孔部からの材料破損を防止するためにかなり大きなサイズの座金などを使用する事が行われている。このような考え方では、本来のCFRPの軽量性が有効利用されていないだけでなく、軽量のCFRP材を用いたために接合部の構造が複雑となりかえって全体重量が増えると言った矛盾を引き起こす。

CFRP材を金属部材に締結する際に課題となる技術的要因を分析すると、大きくは3つの要因がある。1つ目は、ボルト座面との接触に起因する損傷進展である。すなわちボルトを用いてCFRPを締結すると、その表面に位置する母材がボルト座面からの締結摩擦力を先行的に担う事になり、材料の主構造要素である強化繊維はその表面から伝えられる荷重をせん断現象を介して受け持つ構造となる(図2(a)参照)。CFRP材が実用的に長期間使用される事を考えると、その負荷形態は繰り返し疲労荷重となり、その疲労せん断力に起因する界面疲労損傷が金属部材間の締結時には無い特殊現象である。

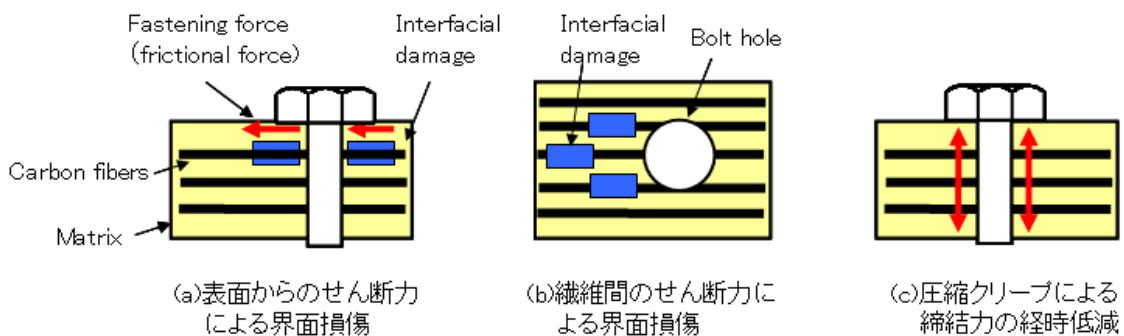


図2 CFRP材を金属部材に締結する際に課題となる技術的要因

2つ目は、材料の主構造要素である強化繊維を切断している構造的特徴を持つ点である。すなわち、ボルト穴となる円孔部はCFRP材にとって強化繊維が切断された空間であり、ボルト面からの締結力はこの切断された強化繊維にせん断力を介して順次伝わらざるを得ない構造を持つ(図2(b)参照)。この付近での複数の繊維間でのせん断力の違いが、あらたな疲労損傷を生じる構造を必然的に持つ。

3つ目は、クリープ現象である。すなわちCFRP材の母材は高分子系材料であり、長期間の使用中でクリープ現象は必然的に生じる。特にCFRP材の繊維方向のクリープ現象は主構造繊維が荷重を分担するためにほぼ無視しても支障は無いが、ボルトの締結方向には強化繊維が無く、母材のクリープ作用、すなわち応力緩和現象は直接的にボルトの締結力の低下に繋がる(図2(c)参照)。これらは独立して生じるのではなく、同時かつ複合的に生じる事になる。

CFRP 材をボルト締結する場合の力学的特徴については多くの研究者によっても研究されており、例えば締結縁がボルトに圧縮接触した場合の繊維のキック損傷については、先行研究によってそのメカニズムがかなり詳細に知られている(例えば、難部ら、日本複合材料学会誌、Vol.37, No.5, pp.172-181(2011)、難部ら、日本複合材料学会誌、Vol.38, No.1, pp.22-29(2012))。これらの研究は独創的かつ先駆的であるが、対象とする荷重条件は静的荷重に限定されており、ワッシャ形状をコーン型にするという独創的な研究例(勝俣ら、JCCM-1, pp.133-136(2010))などを除いては、まだ現象やメカニズムの解明探求の域にある。具体的な立案対策を行い CFRP 材の締結の耐久性を確保するような新手法を開発する新研究が必ず必要である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、一般用途だけではなく、長期間の実働荷重を受ける構造用途に用いられる CFRP(炭素繊維強化プラスチック)材を金属部材と間で汎用ボルトを用いて締結する場合の疲労現象を考慮した設計規準を社会に提唱すると共に、その疲労耐久性を高めるためにボルト締結部での構造変化をもたらすような新しい施工方法を開発し、CFRP 材を実際に広く平易に利用できる技術環境を提供する事を目的とした。具体的には、CFRP 材を金属部材との間で汎用ボルトを用いて締結する場合に、金属部材間を同じく汎用ボルトを用いて締結した場合と同じ耐久信頼性を持つ事を前提に、両者の部材全体としての重量増加率を同じとするための耐久設計規準と新技術を提供する事を目的とした。目標とする増加率を同値としているので、結果的には CFRP 材を用いる場合の重量増加値は低減され、全体としての CFRP 材の利用が促進されるような技術的環境を実現する事を目標とした。

これらにより、ボルト締結される CFRP 材の損傷の程度や機構を単純に評価し検討するのではなく、締結のための構造的な欠陥率をその内部パラメータを用いて予測する手法を確立すると共に、CFRP 材の宿命である繊維切断や締結力の方向への繊維方向の不一致などの欠点を力学的に克服するような新手法を開発する事を本研究の学術的な特色とした。総じて比較的廉価で大量生産されるような自動車用途などの分野でも広く CFRP 材の利用が促進されるような締結耐久技術を社会に向けて開発し発信する事を本研究の意義とした。

3. 研究の方法

初年度においてはまず、現在汎用的に行われている CFRP 材を金属部材とボルト締結した場合の疲労損傷過程を詳細に把握できる研究実験環境を整備した。得られる知見の汎用性とその後の展開を考え、対象とする部材は、直交異方向性[0/90]_s ラミネート材と金属平板とし、直径 8mm 程度の M8 ボルトでの締結とした。この基本条件で 1 面間の締結を行った場合の、引張りせん断疲労荷重下での締結力の低下、内部損傷の発生様相、界面き裂の進展速度(進展率)、残留能力(強度)の低下、長手方向および厚み方向のマクロな剛性の変化などの基本データを把握した。これらをもとに、CFRP 材の締結のための構造的な欠陥率をその内部パラメータを用いて予測する手法を確立する事で、CFRP 材を締結する場合の力学的な留意事項を明確化した。

その後、力学的な問題点を解消するための具体的な対策立案に着手した。ここではまず、申請者がこれまで行って来た CFRP 材の強度や疲労特性を改善するための母材に微細繊維の添加を行う手法を応用し、ボルトの締結面付近を含めて従来の CFRP では強化されない厚み方向の強化の効果を併用する方法を行った。さらにそのカラー材に熱可塑性樹脂を用いる手法を考案し、熱可塑性樹脂を母材とする CFRP 材(いわゆる CFRTP 材)を締結する際に応用した。この手法では、締結の際に締結部付近を加熱し、カラーおよびその周辺部の母材を局所的に熔融させる事で、母材とカラー部との一体化をはかった。結果として締結荷重を伝達する繊維/母材間の界面距離が長くなり、力学的に有利な条件を誘導した。なおここでは基本的にはカラーの材質を CFRTP 材の母材と同材質とし、同じく適切な熔融条件やカラーサイズなどを変化させた場合の力学的挙動の違いを明確にした。

4. 研究成果

研究計画に従い、研究の初年度には CFRP 材を金属部材とボルト締結した場合の疲労損傷過程を把握する研究実験環境を整備した上で、締結部の基本的な構成仕様を変化させた場合のマクロな特性の変化やそのミクロな損傷過程の力学的な留意点を明確化した。2 年目以降においては、継手部の力学的な問題点を解消するための対策案を立案実証し、切断された強化繊維への適切な荷重の流れを得るために予め母材への微細ガラス繊維を添加しておく手法や、微細ガラス繊維を含有させた弾性カラーの併用の効果を明らかにした。

検討の結果、特にボルトの締結力が小さい場合のボルト穴近傍での損傷抑制にこれらの改質弾性カラーの併用の手法が有効であり、最大条件で 51.6%の継手効率の向上効果を得た。いわゆるボルト力の緩和や締め忘れの際の大きな強度低下を防止する安全材としてこの本手法が有効である事をまず明らかにした。またボルト近傍からの損傷現象をき裂進展現象と見なした上で、破壊力学で言うエネルギー解放率を用いて継手強度の違いをより明瞭に記述できる設計規準を提唱した。さらに本研究の最終年度には CFRTP(炭素繊維強化熱可塑性プラスチック)材を対象に、よりその継手強度を向上させるための独自の提案として、バイトプレート(突起を表面に有する金属板)と、微細繊維を添加した母材と同材質な樹脂フィルムを併用し、それらを加

熱及び加圧する事で継手部を局部的に一体構成する新締結手法を開発した(図3参照)。この構造の採用により最大条件で126%の継手効率の向上効果を得るとともに、本研究で対象とした負荷条件の範囲でも最大条件で6.2倍の繰り返し疲労寿命の向上効果を得た。本研究で開発の手法により、継手のボルト穴付近のCFRP本体内の負荷中での界面損傷を抑制でき(図4参照)、いわゆる静的な強度特性だけではなく、疲労耐久性を改善できる事も明らかにした。

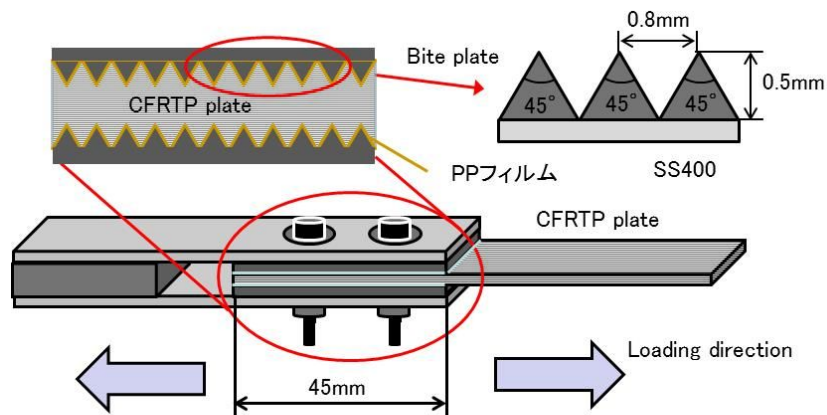


図3 開発したバイトプレートと微繊維を添加した母材と同材質な樹脂フィルムを併用するボルト継手の構成例

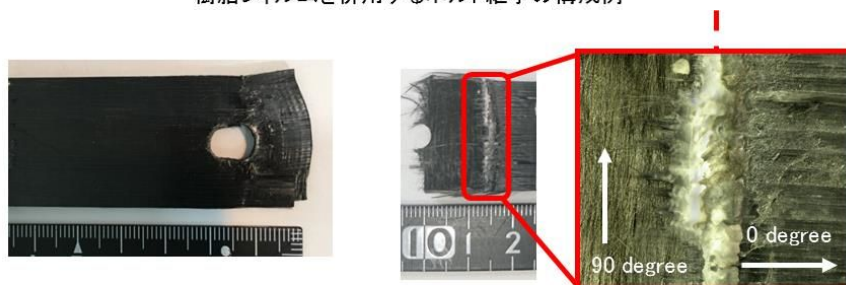


図4 開発手法により継手のボルト穴付近のCFRP本体内に生じる界面損傷を抑制した例。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- (1) The effect of microfibrils cellulose modified epoxy on the quasi-static and fatigue behavior of open hole carbon textile composites, Valter Carvelli¹, Toru Fujii and Kazuya Okubo, Journal of Composite Materials, Vol. 52(24) pp.3365-3380 (2018), 査読有。
- (2) Quasi-static and fatigue performance of carbon fibre reinforced highly Polymerized thermoplastic epoxy, Hironori Nishida, Valter Carvelli, Toru Fujii, Kazuya Okubo, Composites Part B 144 (2018) pp.163-170 (2018), 査読有。
- (3) Improvement of Bending Strength of Carbon Fiber/Thermoplastic Epoxy Composites -Effects of Molecular Weight of Epoxy on Carbon Fiber/Matrix Interfacial Strength and Connection of Cracks in Matrix, Hironori Nishida, Kazuya Okubo, Toru Fujii, Valter Carvelli, Open Journal of Composite Materials, pp.207-217 (2017), 査読有。
- (4) 強化プラスチック, 高分子量化した熱可塑性エポキシを母材とする CFRTP の機械的特性, 西田裕紀, 永井奎祐, 大窪和也, 藤井透, 強化プラスチック, Vol.63 No.6, pp.290-296 (2017), 査読有。
- (5) Repair of flexuously impact damaged CFRTP applying an inserting method with tiny melted sheet of PP resin modified with fine glass fibers, Ryohei Ootani, Kazuya Okubo and Toru Fujii, Key Engineering Materials, Vol.705, pp.108-113 (2016), 査読有。

〔学会発表〕(計43件)

- (1) カーボンナノチューブの利用による樹脂/炭素繊維間の界面強度の改善 -存在位置および樹脂種別による改善効果の違い-, 林研太, 大窪和也, 小武内清貴, 第10回日本複合材料会議 JCCM-10, 1B-15 (2018)。
- (2) 母材へセルロースナノファイバー(CNF)を添加した平織り布 CFRP の疲労寿命 -添加したCNFによる力学的効果-, 林研太, 大窪和也, 小武内清貴, 第10回日本複合材料会議 JCCM-10, 1C-05 (2018)。
- (3) Mechanical joint efficiency of orthotropic CFRTP plate joint fastened by steel bolts -Variation of observed local energy release rate at fracture-, Wataru SHIOYA,

Kiyotaka OBUNAI, Kazuya OKUBO, Takeshi ISHIKAWA, The 12th SPSJ International Polymer Conference (IPC2018), 7G-01 (2018).

- (4) 平織り布強化 CFRP の披露寿命 母材に添加したセルロースナノファイバーの繊維長の影響-, 林研太, 大窪和也, 小武内清貴, 第 10 回自動車用途コンポジットシンポジウム pp.109 - 110 (2018).
- (5) 平織炭素繊維布強化複合材料の母材への微細ガラス繊維の添加による疲労寿命の改善, 大窪和也, 小武内清貴, 藤井透, 第 10 回自動車用途コンポジットシンポジウム, pp.71 - 74 (2018).
- (6) EFFECT OF ADDITION OF FINE SUB-MICRON SIZED AND THICK GLASS FIBERS INTO EPOXY MATRIX ON FATIGUE LIFE OF PLAIN-WOVEN TEXTILE CARBON FIBER COMPOSITE, Kazuya Okubo, Toru Fujii and Tsubasa Kondo, 406 012035 (2018).
- (7) IMPROVEMENT OF MODE-II INTERLAMINAR FRACTURE TOUGHNESS OF CARBON TEXTILE COMPOSITES WITH MODIFIED MATRIX OF THERMOPLASTIC AND THERMOSET EPOXY -ADDITION OF GLASS FIBERS-, Soichiro Imagawa, Hironori Nishida, Kazuya Okubo, Toru Fujii, 13th International conference on Textile Composites, 406 012045 (2018).
- (8) Thermoplastic vs. thermoset epoxy carbon textile composites, Hironori Nishida, Valter Carvelli, Toru Fujii, Kazuya Okubo, 13th International conference on Textile Composites, 406 012043 (2018).
- (9) 低吸水性 M X ナイロンを母材とする CFRTP の吸水後のじん性及び曲げ強度, 伊丹章人, 大窪和也, 小武内清貴, 竹井宏行, 西田裕紀, 第 63 回 FRP 総合講演会・展示会, P-20 (2018).
- (10) EFFECTIVE DIAMETER OF ADDED GLASS FIBER INTO MATRIX OF CARBON FIBER REINFORCED THERMO-PLASTICS FOR IMPROVING MECHANICAL PROPERTIES, Naoto Miyakita, Kazuya Okubo, Kiyotaka Obunai and Kazuya Yanagita, ASC 33rd Annual Technical Conference&18th US-Japan Conference on Composite Materials, No.108 (2018).
- (11) セロロースナノファイバー (CNF) 添加による平織り布 CFRP の疲労寿命の改善, 林健太, 大窪和也, 小武内清貴, 第 43 回複合材料シンポジウム, B1-1-4 (2018).
- (12) EFFECT OF SIZE OF ADDED GLASS FIBERS INTO EPOXY MATRIX ON IMPROVEMENT OF FATIGUE BEHAVIOR AND INTERNAL CRACK GROWTH ALONG CARBON FIBER BUNDLE -DISCUSSION WITH MODEL, K. Okubo, T. Fujii, 7th International Conference on Fatigue of Composites, pp.65 (2018).
- (13) IMPROVEMENT OF FATIGUE LIFE OF PLAIN WOVEN CARBON FIBER REINFORCED PLASTICKS -INFLUENCE OF LENGTH OF CELLULOSE NANO FIBERS AS FILLERS ON FATIGUE LIFE-, K. Hayashi, K. Okubo, T. Fujii, 7th International Conference on Fatigue of Composites, pp.60 (2018).
- (14) ボルト接合された直交 CFRTP 板の継手効率の変化-締結力および本数とボルト穴近傍の局所エネルギー解放率との関係-, 塩谷渉, 大窪和也, 藤井透, 富岡正雄, 石川健, 第 9 回日本複合材料会議(JCCM-9), 2B-07 (2018).
- (15) CFRTP ボルト継手の静的及び疲労特性 - 微細繊維添加カラー併用の効果 -, 塩谷渉, 大窪和也, 藤井透, 富岡正雄, 石川健, 第 9 回自動車用途コンポジットシンポジウム, 第 9 回自動車用途コンポジットシンポジウム, pp.49 - 50 (2017).
- (16) CFRTP 板ボルト継手の継手効率の微細繊維添加カラーの併用による改善, 塩谷渉, 大窪和也, 藤井透, 富岡正雄, 石川健, 日本接着学会第 55 回年次大会, No. P04B (2017).
- (17) Joint efficiency of bolted CFRTP using reinforced collar with sub-micron fibers, Y. YAMADA, K. OKUBO, T. FUJII, A. MAEDA, M. TOMIOKA and T. Ishikawa, The 11th SPSJ International Polymer Conference, pp.125 (2016).
- (18) 微細繊維を添加したカラーを併用してボルト締結された CFRTP 板の継手効率 - 積層構成の影響 -, 山田雄斗, 大窪和也, 藤井透, 前田明宏, 富岡正雄, 石川健, 第 41 回複合材料シンポジウム, 1B-04 (2016).
- (19) ボルト締結された CFRP および CFRTP の継手効率 - 微細繊維を添加したカラー併用の効果 -, 山田雄斗, 大窪和也, 藤井透, 第 7 回日本複合材料会議(JCCM-7), 3B-19 (2016).

その他, 24 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称: 繊維強化樹脂複合材料の接合構造

発明者: 藤井透, 大窪和也, 山田雄斗

権利者: 同志社大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-045982, 特開 2017-159547

出願年: 2016

国内外の別： 国内

名称： 繊維強化樹脂複合材料の接合構造

発明者： 藤井透，大窪和也，大谷龍平

権利者： 同志社大学

種類： 特許

番号： 特願 2016-047929，特開 2017-159605

出願年： 2016

国内外の別： 国内

取得状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名： 藤井 透

ローマ字氏名： Toru Fujii

所属研究機関名： 同志社大学

部局名： 研究開発推進機構

職名： 嘱託研究員

研究者番号(8桁)： 20156821

(2)研究協力者

研究協力者氏名： 熊本 宗一郎

ローマ字氏名： Souichiro Kumamoto

研究協力者氏名： 西田 裕紀

ローマ字氏名： Hironori Nishida

研究協力者氏名： ヴァルター カルベリ

ローマ字氏名： Valter Carvelli

研究協力者氏名： 大谷 龍平

ローマ字氏名： Ryouhei Ootani,

研究協力者氏名： 山田 雄斗

ローマ字氏名： Yuto Yamada

研究協力者氏名： 田中 亜弥

ローマ字氏名： Aya Tanaka

研究協力者氏名： 永井 奎祐

ローマ字氏名： Keisuke NAGAI

研究協力者氏名： 塩谷 涉

ローマ字氏名： Wataru Shioya

研究協力者氏名： 今川 宗一郎

ローマ字氏名： Soichiro Imagawa

研究協力者氏名： 林 研太

ローマ字氏名： Kenta Hayashi

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。