

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04721

研究課題名(和文)炭素繊維強化プラスチックのマトリックス樹脂選択指針の構築

研究課題名(英文)Development for polymer matrix selection guide for carbon fiber reinforced plastic composites

研究代表者

山本 剛 (Yamamoto, Go)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30436159

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の引張強度特性の支配因子をマトリックス樹脂の力学的特性に着目して明らかにすることを主目的としている。炭素繊維が一方に配向した一方材を評価対象として、破断繊維に隣接する炭素繊維表面の応力集中緩和の程度ならびに炭素繊維とマトリックス樹脂の熱膨張係数の違いに起因する炭素繊維の残留ひずみを考慮することで、マトリックス樹脂のき裂先端開口変位(CTOD)特性が一方CFRPの引張強度特性の支配因子であることを明らかにするとともに、低いCTOD特性を有するマトリックス樹脂を用いることで一方CFRPのさらなる引張強度特性の向上が達成できることを示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

持続可能で豊かな社会の実現のために炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の特性向上を目指した研究が世界規模で進められている。しかしながら、CFRPの力学的特性を支配する一因である繊維表面の応力集中の程度をマトリックス樹脂の物性の観点から緩和させ、CFRPの力学的特性の向上を目指した研究は行われていなかった。本研究では、き裂先端における開口変位特性が低いマトリックス樹脂を用いることでCFRPの引張強度特性の向上が達成できることを明らかにするとともに、本発見はカーボンナノチューブ複合材料ならびにセルロースに代表される天然繊維を活用した次世代の複合材料開発にも適用することができる技術である。

研究成果の概要(英文)：The tensile strength-controlling factors of unidirectional carbon fiber reinforced plastics (CFRP) composites were investigated focusing on assessing the mechanical properties of the epoxy matrix. The degree of concentrated stress acting on the intact fiber surface, which determines the tensile strength properties of unidirectional CFRP composites, was evaluated by implementing double-fiber fragmentation tests in conjunction with numerical simulations. Correlation analysis was conducted, with the aim of extracting the factors that characterize the tensile strength of the unidirectional CFRP composites. The analysis of six epoxy materials with different mechanical properties demonstrated that the matrix crack tip displacement (CTOD) exhibited a linear correlations with surface stress concentration factor (SCF). These results revealed that CTOD is one of the dominant factors influencing the tensile strength characteristics of unidirectional CFRP composites.

研究分野：複合材料学

キーワード：炭素繊維強化プラスチック 複合材料 引張強度予測 応力集中 自己組織化マップ フラグメンテーション試験 数値解析

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、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

持続可能で豊かな社会を支える基盤技術として炭素繊維強化プラスチック (CFRP) のさらなる破壊特性の向上を目指した研究が世界規模で進められている。CFRP の強化要素である炭素繊維の強度ならびに弾性特性の向上を目指した研究は行われているものの、CFRP の引張強度特性を支配する一因である繊維表面の応力集中の程度をマトリクス樹脂の物性の観点から緩和させ CFRP の力学的特性の向上を目指した研究は必ずしも期待に沿うところになっていない[1, 2]。

CFRP は炭素繊維が一方向に配列した一方向 CFRP を所定の向きに積層させた疑似等方積層板として使用される場合が多い。この積層板の構成要素である一方向 CFRP の破壊プロセスを考えると、破断を生じた繊維が担っていた荷重はマトリクス樹脂を介して隣接する健全な繊維に分配される。これにより隣接繊維の表面には顕著な応力集中が生じ、さらなる繊維破断を誘起することとなる。このプロセスが繰り返されることにより損傷集積部が形成され最終破断に至る。これまでも繊維表面の応力集中の評価に関する研究は行われており、その重要性は認識されているものの、その主要な研究内容は応力集中係数の同定や引張強度予測を目指したものであった。

2. 研究の目的

本研究は、現在の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の力学的特性向上の停滞をブレークスルーするためには、「どのような物性を有する樹脂を CFRP のマトリクス材として選択すべきか？」の命題に対して明確な答えを提示することを目的としている。航空機・自動車の軽量構造材料、風力発電の回転翼材料さらにはタブレット型端末の筐体材料など、国民生活の利便の増進に資する CFRP を開発するためには、炭素繊維の力学的特性の向上のみならず一方向 CFRP の損傷・破断を誘起する繊維表面の応力集中を緩和させることができるマトリクス樹脂の選択指針を構築することが必要である。本研究は、実験と解析の両アプローチにて、応力集中を緩和させることができるマトリクス樹脂を発見し、さらにはマトリクス樹脂のどの物性が一方向 CFRP の引張強度特性の支配因子であるかを明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究は研究目標を達成するために設定した 4 つの研究課題から構成されている。

- (1) マトリクス樹脂の力学的特性評価
- (2) フラグメンテーション試験とばね要素モデルによる応力集中係数の推定
- (3) 引張強度予測と実験手法による強度・弾性特性評価
- (4) 異方性弾性定数の同定

力学的特性の異なる 12 種類のエポキシ系樹脂を用いてマトリクス樹脂試験片の作製を行い、単軸引張試験ならびにシングルエッジ・ノッチド・ビーム試験により縦弾性係数、引張強度、ポアソン比ならびに破壊靱性値を測定した[1, 2]。炭素繊維には東レ社製 T1100GC 繊維を、マトリクス樹脂は課題(1)の結果に基づき選定した 6 種類のマトリクス樹脂を複合材料作製の出発原料に用いた[2]。引張荷重の負荷に伴う炭素繊維の破断挙動は 2 本の繊維をマトリクス樹脂に平行に埋入したダブルファイバーフラグメンテーション試験法 (DFFT 法) を用いて光学顕微鏡観察下において測定した。炭素繊維とマトリクス樹脂の熱膨張係数の違いに起因する炭素繊維の残留ひずみをラマン分光法を用いて測定を行い、隣接繊維破断挙動のキャリブレーションデータとして用いた。次に、DFFT を模擬したモデルを用いた数値解析手法において、繊維の破断挙動が DFFT 試験にて得られた破断挙動と一致するように応力集中係数を調整することで繊維表面に生じている応力集中係数を同定した[1, 2]。一方向 CFRP 試作体はオートクレーブ法を用いて作製し、単軸引張試験により応力ひずみ曲線を取得した。一方向 CFRP の引張強度特性を支配するマトリクス樹脂の力学的特性は、データマイニング手法の一つである自己組織化マップ (SOM) を用いることで抽出を行った。さらに、遺伝的アルゴリズムに支援された共鳴超音波スペクトロスコピー法を用いることで一方向 CFRP の異方性弾性定数の測定を行った。

4. 研究成果

本研究で評価対象とした 12 種類のマトリクス樹脂は、いずれも単軸引張荷重下において典型的な弾塑性挙動を示すものであった。単軸引張試験とシングルエッジ・ノッチド・ビーム試験に

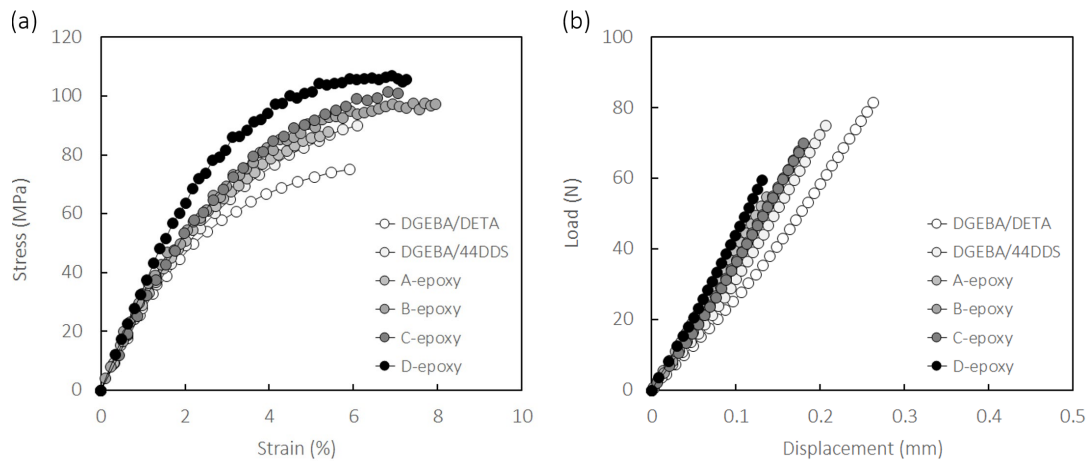


図1 単軸引張試験とシングルエッジ・ノッチド・ビーム試験により得られた代表的なマトリクス樹脂の(a)応力-ひずみ線図と(b)荷重-変位線図[2].

より得られた代表的なマトリクス樹脂の応力-ひずみ線図と荷重-変位線図をそれぞれ、図 1(a)と図 1(b)に示す。

次に、破断繊維に隣接する健全な繊維表面に発生する応力集中の程度を定量的に評価することを目的として DFPT を実施した。図 2 に DGEBA/44DDS ならびに B-epoxy をマトリクス樹脂に用いて作製した DFPT により得られた繊維破断挙動を示す。なお、図 2 に示した繊維破断挙動は繊維ひずみがそれぞれ、3.26%と 3.10%の条件で得られたものである。また、図中の灰色シンボルは隣接破断繊維が生じた場所を示しており、一方で白色のシンボルは繊維の強度分布に起因して破断した場所を示している[2]。図 2(a)より DGEBA/44DDS をマトリクス樹脂に用いた試験片では繊維破断箇所を起点としてマトリクスき裂が進展している様子が観察されるとともに、高い割合で隣接繊維破断が生じている様子がわかる。同様の観察結果は、図 2(b)に示した B-epoxy をマトリクス樹脂に用いた試験片からも確認をすることができる。本研究で DFPT に供した 6 種類のマトリクス樹脂を用いて作製した試験片の隣接繊維破断確率と標準偏差は、表 3 に示すように DGEBA/44DDS は 75.7% (± 10.3%)、B-epoxy は 48.3% (± 14.1%)、DGEBA/DETA は 89.3% (± 9.9%)、A-epoxy は 43.2% (± 14.5%)、C-epoxy は 54.4% (± 15.5%) ならびに D-epoxy は 9.1% (± 4.3%) であり、マトリクス樹脂の力学特性の違いに起因して隣接繊維破断確率は大きく異なることがわかった。

数値解析手法による繊維の破断挙動が上述した DFPT 試験にて得られた破断挙動と一致するように応力集中係数を調整することで繊維表面に生じている応力集中係数を同定した[1, 2]。表 3 に同定した応力集中係数を記載する。DGEBA/44DDS を用いて作製した試験片においては、平均繊維応力の約 2.16 倍の応力が隣接繊維表面に生じていることがわかった。

隣接繊維表面に発生する応力集中の程度とマトリクス樹脂の力学的特性との関係を明らかにするために、応力集中係数と力学的特性との相関関係の解析を行った。図 3(a)-(d)に応力集中係数とマトリクス樹脂の力学的特性との関係を示す。なお、図中の破線は各々の力学的特性と応力集中係数との間に線形の相関性があると仮定して、最小二乗法により計算した回帰直線を表している。若干の変動は認められるものの、高い引張強度ならびに縦弾性係数を兼ね備えたマトリクス樹脂は低い応力集中係数を示す傾向が認められ、その一方で、高い破壊靱性特性を有するマトリクス樹脂は高い応力集中係数を示す傾向があることがわかる。これは、脆性的な破壊挙動を有するマトリクス樹脂は応力集中係を低下させることに有効であるが、一方で延性的な破壊挙動を示すマトリクス樹脂は応力集中係を増加させることを示唆するものである。一方向 CFRP の引張強度特性の支配因子をマトリクス樹脂の力学的特性の観点で抽出することを目的として、データマイニング手法の一つである自己組織化マップ(SOM)を用いた。その結果、ヤング率、降伏応力ならびに応力拡大係数をパラメータとするマトリクス樹脂のき裂先端開口変位こそが一方向 CFRP の引張強度特性の支配因子であることが示されるとともに、き裂先端開口変位特性が低い樹脂種を一方向 CFRP のマトリクス材に用いることにより、一方向 CFRP のさらなる引張強度特性の向上が達成できることを示すことができた。

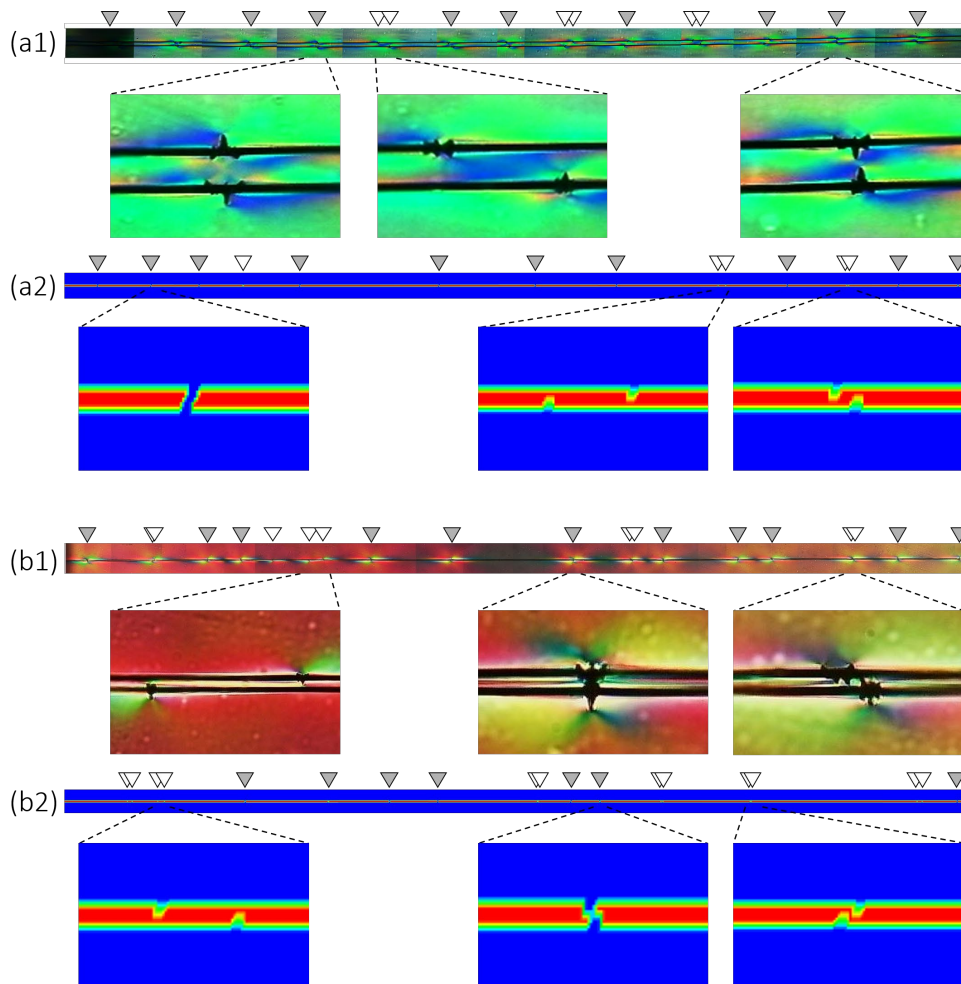


図2 (a1, a2) DGEBA/44DDS ならびに (b1, b2) B-epoxy をマトリクス樹脂に用いて作製した DFFT により得られた繊維破断挙動と数値解析結果

表1 本研究で DFFT に供した 6 種類のマトリクス樹脂を用いて作製した試験片の隣接繊維破断確率と応力集中係数の関係

Matrix type ^o	Percentage of coordinated fracture (%) ^o	Applied fiber strain (%) ^o	SCF (-) ^o
DGEBA/DETA ^o	89.3 ± 9.9 ^o	3.42 ± 0.12 ^o	2.35 ± 0.24 ^o
DGEBA/44DDS ^o	75.7 ± 10.3 ^o	3.29 ± 0.03 ^o	2.16 ± 0.14 ^o
A-epoxy ^o	43.2 ± 14.5 ^o	2.87 ± 0.08 ^o	2.15 ± 0.11 ^o
B-epoxy ^o	48.3 ± 14.1 ^o	3.19 ± 0.06 ^o	1.95 ± 0.12 ^o
C-epoxy ^o	54.4 ± 15.5 ^o	3.28 ± 0.16 ^o	1.93 ± 0.24 ^o
D-epoxy ^o	9.1 ± 4.3 ^o	2.53 ± 0.14 ^o	1.75 ± 0.03 ^o

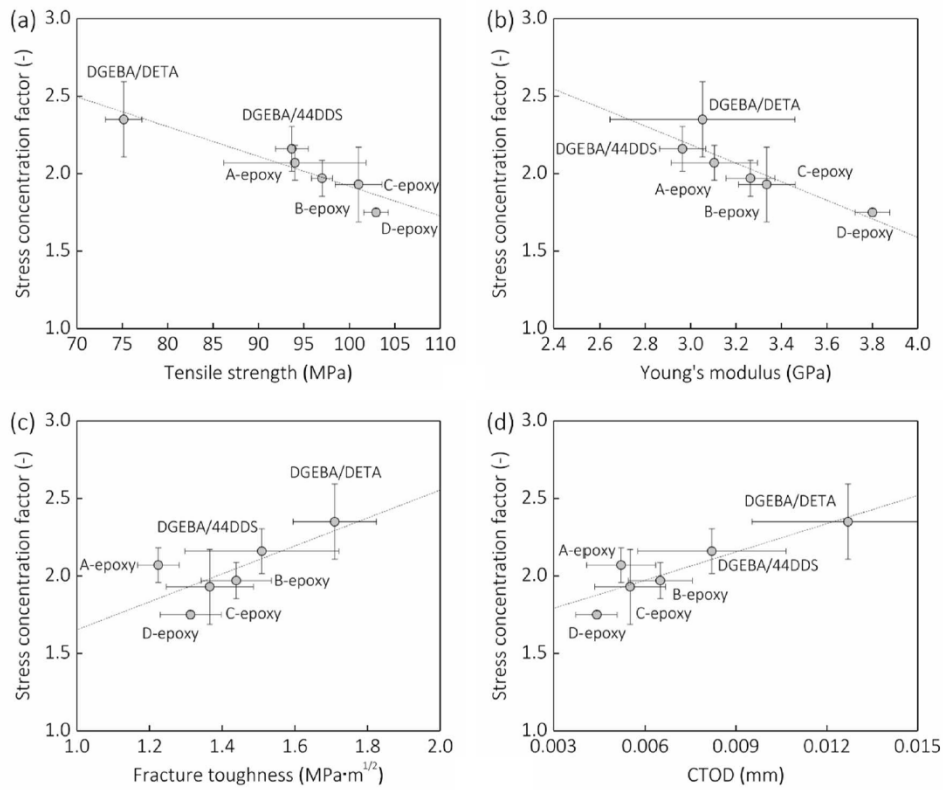


図 3 応力集中係数とマトリクス樹脂の (a) 引張強度、(b) 縦弾性係数、(c) 破壊靱性値ならびに (d) き裂先端開口変位との関係

<引用文献>

- [1] Go Yamamoto, Miho Onodera, Keita Koizumi, Jun Watanabe, Haruki Okuda, Fumihiko Tanaka, Tomonaga Okabe, Considering the stress concentration of fiber surfaces in the prediction of the tensile strength of unidirectional carbon fiber-reinforced plastic composites, *Composites Part A*, 121, 2019, 499-509.
- [2] Go Yamamoto, Keita Koizumi, Takahiro Nakamura, Noriyuki Hirano, Tomonaga Okabe, Tensile-Strength-Controlling Factors in Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites, *Composites Part A*, 140, 2021, 106140.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Yamamoto Go, Koizumi Keita, Nakamura Takahiro, Hirano Noriyuki, Okabe Tomonaga	4. 巻 140
2. 論文標題 Tensile-strength-controlling factors in unidirectional carbon fiber reinforced plastic composites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 106140 ~ 106140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2020.106140	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 Go Yamamoto, Miho Onodera, Keita Koizumi, Jun Watanabe, Haruki Okuda, Fumihiko Tanaka, and Tomonaga Okabe	4. 巻 121
2. 論文標題 Considering the stress concentration of fiber surfaces in the prediction of the tensile strength of unidirectional carbon fiber-reinforced plastic composites	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 499-509
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2019.04.011	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 Go Yamamoto and Tomonaga Okabe	4. 巻 6
2. 論文標題 Numerical study for tensile strength prediction of unidirectional carbon fiber-reinforced composite considering fiber surface stress concentration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 19-0002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/mej.19-00020	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4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 松井一真、山本剛
2. 発表標題 共振超音波スペクトロスコピー法を用いた炭素繊維およびその構成材料の弾性定数の評価
3. 学会等名 第12回日本複合材料会議 (JCCM-12)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本龍一郎、松井一眞、山本剛
2. 発表標題 共振超音波スペクトロスコピー法を用いた不連続炭素繊維強化熱可塑性複合材料の異方性弾性定数の評価
3. 学会等名 第12回日本複合材料会議 (JCCM-12)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Go Yamamoto
2. 発表標題 Prediction of Tensile Strength of Unidirectional Carbon-Fiber Reinforced Plastic composites : Experimental and Numerical studies
3. 学会等名 International Conference on Chemical Physics and Material Science (ICCPMS2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Go Yamamoto, Miho Omodera, Jun Watanabe, Haruki Okuda, Fumihiko Tanaka, Tomonaga Okabe
2. 発表標題 PREDICTION OF TENSILE STRENGTH OF UNIDIRECTIONAL CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS
3. 学会等名 11th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 山本剛	4. 発行年 2020年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 322
3. 書名 空飛ぶクルマ 空のモビリティ革命に向けた開発最前線 第4章第1節 CFRP の軽量化へのアプローチ	

1. 著者名 Go Yamamoto, Keita Koizumi, Tomonaga Okabe	4. 発行年 2020年
2. 出版社 InTech open access publisher	5. 総ページ数 12
3. 書名 Tensile Strength of Unidirectional Carbon Fiber-Reinforced Plastic Composites	

〔産業財産権〕

〔その他〕

山本研究室のwebページ http://www.yamamolab.mech.tohoku.ac.jp/

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		
韓国	Sungkyunkwan University		