

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04578

研究課題名（和文）断面内における繊維不均一性を有するFRP部材の部材強度評価法の開発

研究課題名（英文）Development of evaluation method for member strength of FRP members with fiber nonuniformity in cross section

研究代表者

橋本 国太郎（HASHIMOTO, KUNITARO）

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40467452

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、強化繊維プラスチックの部材断面内の繊維含有率のばらつきの影響を考慮した部材の強度評価法を開発することを目的としている。対象としてガラス繊維強化プラスチックを用いて製作されたチャンネル部材を用い載荷実験を行った。本実験では、2種類のGFRPと2種類のサイズのチャンネル部材を用いて、クーボン試験片、板要素試験体および部材試験体の引張、圧縮、せん断試験を実施した。その結果、引張および圧縮強度ではクーボン試験および板要素試験の平均強度に対する部材強度の比を明らかにした。せん断試験では、部材寸法によって破壊モードの違いが生じ、クーボン試験のみでは部材強度が予測できない場合もあることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、土木分野では、構造物の劣化が顕著となっており社会問題化している。その中で、高耐久性のある構造材料の開発が進められており、その一つとして、本研究では繊維強化プラスチック材料を用いた構造部材に着目し、その部材強度の評価方法を検討した。本研究結果により、より精度の高い部材強度評価が行うことができ、このような構造部材の適用性が高まることで、より耐久性が高い構造物の開発につながると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a strength evaluation method for reinforced fiber plastic members that takes into account the effect of variations in fiber content in the cross section of the member. Loading tests were conducted on channel members made of glass fiber-reinforced plastic (GFRP). In this experiment, two types of GFRP and two sizes of channel members were used to conduct tensile, compression, and shear tests on coupon specimens, plate element specimens, and member specimens. The results revealed the ratio of member strength to the average strength of the coupon and plate element tests in tensile and compressive strength. In the shear tests, it was found that the member strength could not be predicted solely from the coupon tests because the failure modes differed depending on the member dimensions.

研究分野：鋼構造，複合構造

キーワード：ガラス繊維強化プラスチック 部材強度 繊維含有率 引張強度 圧縮強度 せん断強度

1. 研究開始当初の背景

FRP 材料は繊維と樹脂によって構成されている複合材料であり、軽量かつ高強度で高耐久性を有していることで、近年、水門、歩道橋および検査路などの土木構造物にも用いられてきている。また、このような構造物の設計を行うために、FRP 歩道橋設計指針(案)や FRP 水門設計指針(案)が土木学会から発刊されており、さらに、2014 年には複合構造標準示方書にも FRP 部材編が加わるなど、近年、設計関連の図書が整備されつつある。

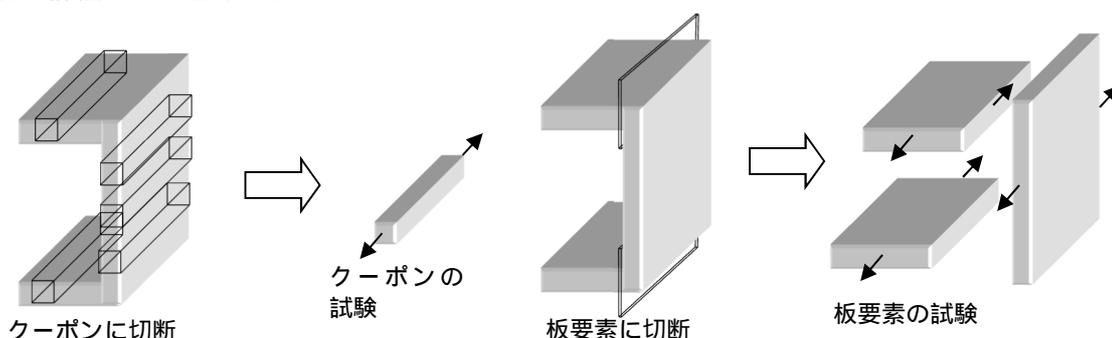
このような FRP 部材を設計するために用いられる材料係数や部材係数を設定するために、特に断面内の繊維の分布が不均一な C 形部材や I 形部材、箱形断面部材などの隅角部を有する FRP 部材に対して種々の実験的検討が行われてきている。既往の研究では、C 形部材に対してクーポンレベルによる引張試験、圧縮試験および曲げ試験を行い、それらのばらつきの原因調査やクーポンの採取位置による強度の違いなどを検討しており、さらには部材試験との比較などが行われている。

その既往の研究の成果として、FRP 部材の隅角部と平面部では、材料強度に差があり、隅角部では平面部に比べ繊維含有率が少ないことから、その部位の材料強度が小さくなることがわかっている。また、部材試験とクーポン試験との強度差は、1 方向に繊維が配向された部材の引張荷重の場合、クーポンの平均強度が部材の強度に比べ 1.16 倍大きい結果が得られ、圧縮荷重の場合は、1.4 倍程度となり、2 方向に繊維が配向された部材では圧縮荷重で 1.1 倍の強度比が得られている(引張方向は実施できず)。このように荷重方向や繊維配向の違いにより、強度比が異なる結果となっているが、その原因が良くわかっていないことや 2 方向材の引張方向での検討が行っておらず、未解明の部分が多い。

2. 研究の目的

上述の背景より、本研究では、繊維が不均一に入っている隅角部などを有する FRP 部材に対して、その部材強度を精度よく評価できる手法を開発することが大きな目的である。

本研究では、できるだけ簡易に部材強度を評価するために、図-1 に示すように部材をフランジ板やウェブ板で分割し、隅角部や平面部を含んだ板要素試験片に対して荷重試験を行う手法を提案する。通常の方法では、平面部のみを採取することで、部材の強度としているが、既往の研究結果より、隅角部の影響で、部材強度は低下することがわかっている。しかし、部材をそのまま実験することは費用や時間がかかり、製品ごとに部材試験をすることは厳しいと考えられる。そこで、上述の方法により、隅角部も含む部材の全断面を含む強度がわかり、簡易に部材強度を評価できると考えられる。



(a) 従来のクーポン試験片による試験 (b) 提案する板要素試験片による試験

図-1 通常のクーポン試験片と提案する板要素試験片の採取イメージ

3. 研究の方法

本研究では、土木 FRP 構造物でよく用いられているガラス繊維を用いた GFRP の部材軸方向に繊維が配向された 1 方向材、および部材軸方向および軸直角方向に配向された 2 方向材の基本的な FRP 部材を対象とし、その FRP 部材の基本強度である引張強度、圧縮強度(座屈しない極短柱での強度)およびせん断強度の 3 つとした。引張および圧縮試験で使用した部材は C200 と C100 というウェブ高さが 200mm と 100mm の 2 種類で、せん断試験で使用した部材は C200 のみ、また 1 方向材では C200 と C125 である。

それぞれの強度を求めるためにクーポン試験、前述した板要素試験(引張および圧縮のみ)および部材試験を実施した。研究期間は 3 年間であり、初年度に、引張荷重試験を実施し、二年目には圧縮荷重試験を実施、最終の三年目にせん断荷重試験を実施した。

引張および圧縮試験に用いた試験片および試験体を図-2 および図-3 に示す。また、せん断試験で使用した試験片(ウェブの 45°方向引張試験、0°方向、90°方向 V ノッチ試験、フランジの面外せん断試験)および部材試験体を図-4 に示す。なおフランジの部材強度への影響を検討するために、1 方向材 C125 と 2 方向材 C200 ではフランジ幅を小さくする加工を施した。具体的

には1方向 C125 では元のフランジ幅 65mm を 35mm に、2方向 C200 では 90mm を 35mm とした。

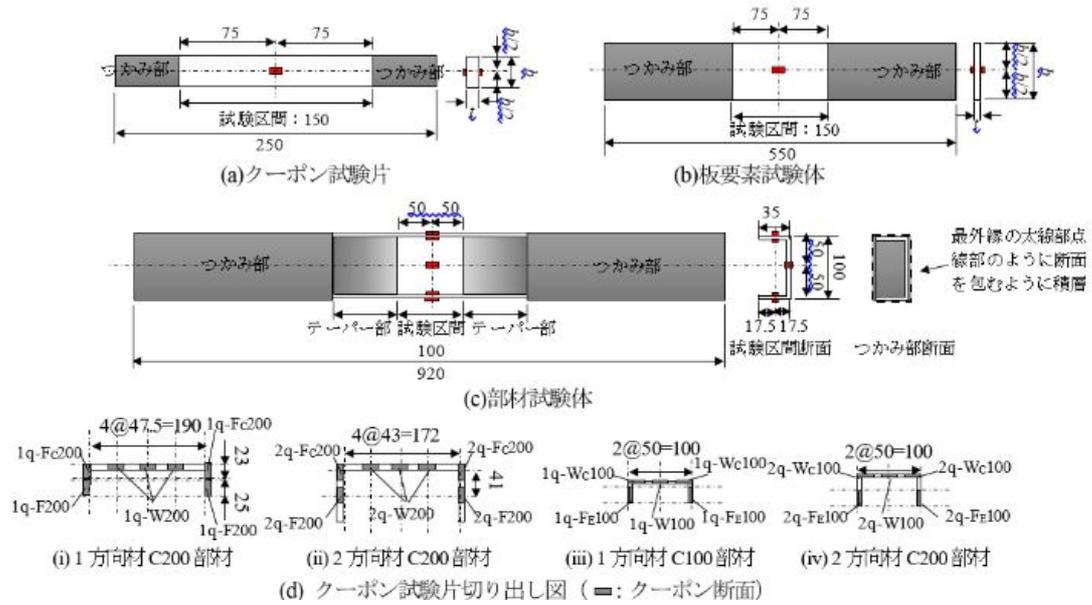


図-2 引張試験に使用した試験体

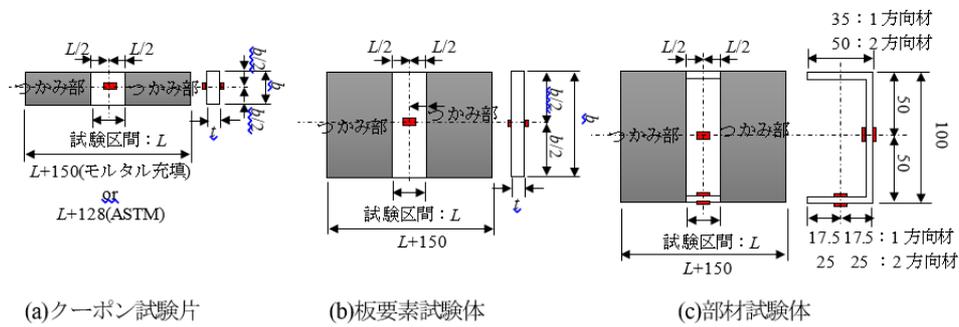


図-3 圧縮試験に使用した試験体

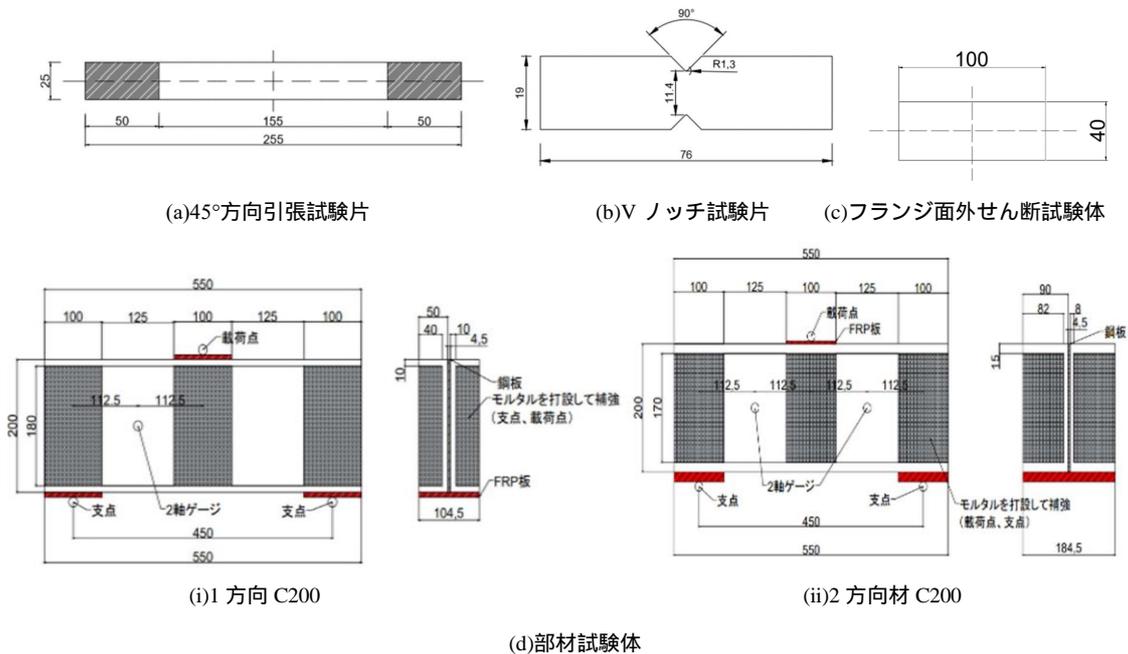


図-4 せん断試験に使用した試験体

4. 研究成果

4.1 引張および圧縮試験

各試験の平均強度（クーポン試験であれば、全個所のクーポン試験結果の平均値）を図 - 5 に示す。図 - 5 の横軸の記号は試験体の種類を表しており q はクーポン試験片 p は板要素試験体、m は部材試験体である。

図 - 5 より、引張強度と圧縮強度を比較すると、C200 では差があまりにないのに対し、C100 の 1 方向材では大きな差が出ており、引張強度と圧縮強度の差が大きい。特に、C100 の板要素試験（1p）や部材試験（1m）の圧縮試験は、試験区間長を 5mm（クーポン試験では 25mm）として行ったにも関わらず、クーポン試験（1q）と同程度の強度差が出ていることがわかる。このクーポン試験での結果でも圧縮強度は引張強度に対して 7 割程度となっている。

2 方向材でも、そこまで大きな強度差が出ていないものの、C200 では圧縮強度の方が大きいにもかかわらず、C100 では圧縮強度が引張強度より若干小さくなっている。この強度が低下した原因として、C100 のクーポン試験に関しては、C200 と板幅は同じで、板厚が違うのみであることから、幅厚比が大きくなることによる繊維の座屈などが原因で強度低下が生じたと推察されるが、今後、データ数を増やしより詳細な検討が必要である。

部材強度とその他の試験結果の比率をまとめたものを表 - 1 に示す。この結果より、引張試験では、ウェブのみのクーポン試験と部材強度との比率が一番大きく 1.24~1.26 であるが、全クーポンの平均と部材強度との比率は 0.98~1.18 となっていることがわかる。これらの傾向は、既往の研究と同様である。また板要素強度では、1.08~1.20 と全クーポンとの比率より若干大きい値となり、板要素強度から直接、部材強度を予測することは難しいことがわかった。

圧縮試験に関しては、引張試験に比べクーポン試験と比較した場合の比率が小さくなり、1.0 に近い値となっている。これは、C100 の板要素試験と部材試験では試験区間長を小さくしたことが原因と考えられる。このことから、この試験区間長を短くした部材強度が真の部材強度と仮定すると、今回行ったクーポン試験と部材試験の方法より、部材強度を精度よく予測ができる可能性がある。一方、同一の試験区間長で行っている板要素試験と部材試験との比率を見ると、引張試験と同等程度の比率となっている。また、2 方向材のクーポン全平均と部材試験の比率は 0.9 となっており、引張と同様に少し小さい値となっている。これはクーポン試験においてフランジ先端部の強度が小さかったことが影響しており、平均の取り方に断面積分の重みを付けるなどの工夫が必要と考えられる。

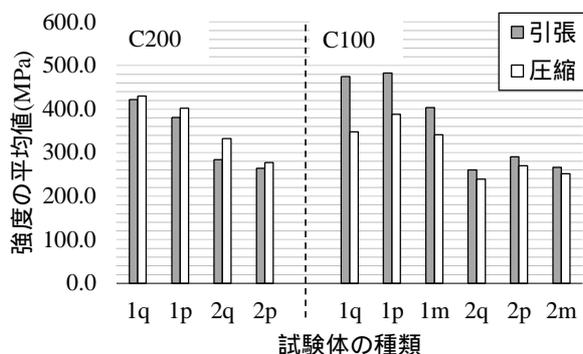


図 - 5 引張および圧縮試験における各試験体の平均強度

表 - 1 各試験体の強度比

	引張試験		圧縮試験		圧縮試験(補正)	
	1方向材	2方向材	1方向材	2方向材	1方向材	2方向材
全クーポン/部材	1.176	0.979	1.020	0.901	1.093	1.083
ウェブクーポン/部材	1.260	1.236	1.033	1.031	1.107	1.295
全板要素/部材	1.198	1.079	1.138	1.074	1.138	1.074

4.2 せん断試験

図-6より各クーポン試験で比較すると、1方向材ではC200では45°引張試験およびVノッチの0°方向、90°方向とも同程度の値であるが、C125では、45°引張試験の強度が著しく低く、Vノッチ0°方向および90°方向にも明確な差が出ていることがわかる。これは、C200とC125は製作会社が違うことから表層の積層構成の違いによるもので、C200は表層により多方向に繊維が配向されており、C125では部材軸方向により繊維が配向されているためである。2方向材ではVノッチ試験の方向による強度の変化はほとんどなく、45°引張試験の結果が若干小さくなった。次に、フランジの面外せん断強度を比較すると、1方向材ではC125が大きな強度を示していることがわかる。

部材強度とクーポンの強度を比較すると、1方向材のC200では、Vノッチ試験ほどの強度は

出ていないことがわかる。これは C200 の部材試験での破壊モードがウェブとフランジとの境界部で破壊したため、フランジの面外強度と同程度が、それよりも若干大きな結果となった。次に C125 では、フランジ加工を施した場合（1m-2、フランジ幅 35mm）とそうでない場合（1m、フランジ幅 65mm）で大きな強度の差は生じていない。これは、両タイプとも破壊モードがウェブのせん断破壊（水平方向に亀裂が入った）であったため、V ノッチ試験の 90°方向の強度とほぼ同等となったと考えられる。2 方向材のフランジ加工無し（2m、フランジ幅 90mm）では部材強度が V ノッチ試験より大きくなっているが、これはフランジも協同して荷重分担しているためと考えられる。これはフランジ加工を施した（2m-2、フランジ幅 35mm）試験体の強度が、ほぼ V ノッチ試験の強度と同等となっていることから説明ができる。

最後に表-2 には、各クーポン試験もしくはフランジの面外強度と部材強度との比を示しているが、上述したような結果を反映しており、1 方向材では破壊モードによって、ウェブの 90°方向のせん断強度もしくはフランジの面外せん断強度が部材強度と近くなり、2 方向材では、ウェブの 0°もしくは 90°方向のせん断強度にフランジ強度の影響を累加することにより部材強度が予測できる可能性がある。1 方向材と 2 方向材でこのような差が出た原因としては、繊維配向が大きく影響し部材のせん断破壊モードが生じたためと考えられる。

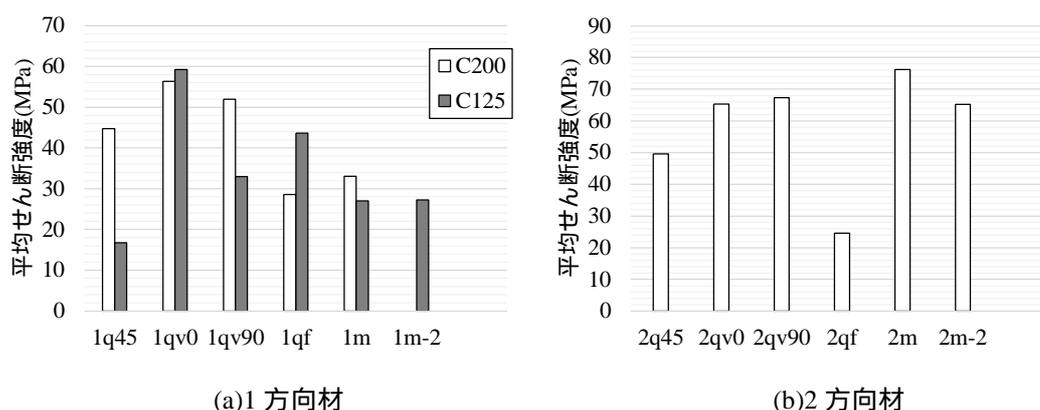


図 - 6 せん断試験における各試験体の平均強度

表 - 2 各試験体の強度比

	1方向材			2方向材	
	C200	C125フランジ加工無し	C125フランジ加工有り	フランジ加工無し	フランジ加工有り
45°方向クーポン/部材	1.35	0.62	0.62	0.65	0.76
0°方向クーポン/部材	1.70	2.19	2.17	0.86	1.00
90°方向クーポン/部材	1.57	1.22	1.21	0.88	1.03
フランジ板/部材	0.86	1.61	1.60	0.32	0.38

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 二見悠太郎, 橋本国太郎	4. 巻 8
2. 論文標題 断面内の繊維不均一性を有するGFRP部材の部材強度評価法の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第8回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集	6. 最初と最後の頁 87-94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 新居大知, 橋本国太郎	4. 巻 8
2. 論文標題 GFRP材のせん断挙動の解明とその評価方法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第8回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集	6. 最初と最後の頁 110-118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 橋本国太郎, 二見悠太郎, 岡井大樹, 日比英輝, 池田哲雄	4. 巻 68A
2. 論文標題 GFRP部材の引張および圧縮強度評価のための実験的研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 836-849
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 新居大知, 橋本国太郎
2. 発表標題 GFRP部材のせん断強度および変形能の評価
3. 学会等名 令和2年土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 二見悠太郎, 橋本国太郎
2. 発表標題 断面内の繊維不均一性を有するFRP部材の強度評価法の検討
3. 学会等名 第75回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 二見悠太郎, 橋本国太郎
2. 発表標題 断面内の繊維不均一性を考慮したFRP部材の強度評価
3. 学会等名 令和元年土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二見悠太郎, 橋本国太郎
2. 発表標題 断面内の繊維不均一性を有するFRP部材の部材引張強度評価法の検討
3. 学会等名 第13回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二見悠太郎, 橋本国太郎
2. 発表標題 断面内の繊維不均一性を考慮したGFRP部材の部材強度評価法の検討
3. 学会等名 第76回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新居大知, 橋本国太郎, 中村一史
2. 発表標題 GFRP部材のせん断強度および変形能の評価
3. 学会等名 第76回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------