

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：17301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23552

研究課題名（和文）鋼管に木材とグラウトを充填した合成構造耐震補強材の開発に関する研究

研究課題名（英文）Development of Hybrid Braces Composed of Steel Tube, Cement Grout and Lumber for Seismic Retrofitting

研究代表者

陳逸鴻（CHAN, Iathong）

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号：00846123

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、離島・山間部・発展途上国など重機が利用できない地域の耐震補強のために、新しい耐震部材の開発を目的としている。具体的には、木材とグラウト（無収縮モルタル）を鋼管に充填したハイブリッド部材を用いた耐震補強工法である。このハイブリッド部材を対象に数十体分の載荷実験と数値計算を行い、耐震補強部材としての性能を十分に有することを確認した。また、以上の結果に基づき、現在ルーマニアではこの新しいハイブリッド部材を用いた耐震補強の計画が進められている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の地震予測より、いままでに経験したことのない地震が起きる可能性があると言われている。そのため、世界各地の地震多発地域で、既存の建物の耐震補強が急務となっている。しかしながら、離島・山間部・発展途上国など重機が利用できない地域では、耐震補強が進められていない。その要因の一つは、従来の耐震補強工法には重機と大量の特殊な素材が必要なことにある。以上の状況に対して、本研究では離島・山間部・発展途上国でも簡単に入手できる材料を利用し、人力のみで施工可能な耐震補強工法を開発・研究している。その結果、新しいハイブリッド部材の開発に成功し、世界中の耐震補強に役立てられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a new seismic retrofitting members for the earthquake-prone areas where heavy machinery cannot be used, such as remote islands, mountainous areas, and developing countries. The seismic retrofitting member of this research is a hybrid member that consists of wood, grout (non-shrink mortar), and steel tube. We conducted loading tests and numerical calculations for dozens of those hybrid members, and confirmed that they have sufficient performance as seismic retrofitting members. In addition, based on the above results, a plan for seismic retrofitting using this new hybrid member is currently underway in Romania.

研究分野：建築構造

キーワード：耐震補強 CFTブレース 長柱中心圧縮実験 累加座屈耐力

1. 研究開始当初の背景

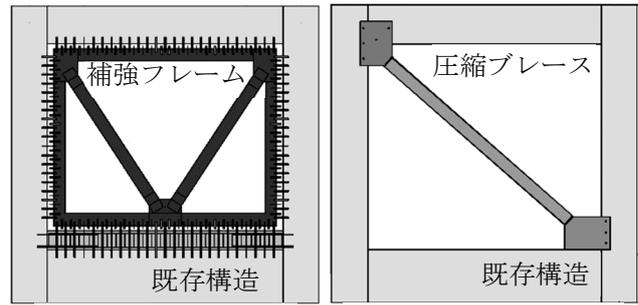
現在、日本だけでなく世界中で既存の建物に対する耐震補強の需要が高まっている。特に、離島、山間部、発展途上国など重機が使用できない地域に対して、簡易な耐震補強法の開発が緊急な課題となっている。

図1(a)に示す従来の補強工法は、ブレースが負担する引張力を既存RCフレームに伝達するため、多数のあと施工アンカーやスタッドを必要とする。一

方で、図1(b)に示すCFT-SS補強工法では、ブレースにコンクリート充填鋼管(CFT)を使用して、これを圧縮力のみで抵抗させることで、従来の補強工法で必須の枠材と多量のスタッド・あと施工アンカーを不要とした^{1),2)}。これにより、コストと工期の大幅な削減を実現できている。

一方で、ルーマニアでCFT-SS補強工法を試したところ、斜材(以下、圧縮ブレース)の軽量化と施工の簡便化に関する要請があった。そのため、本研究では、資源が限られている発展途上国における耐震補強の普及を考え、新しいタイプの圧縮ブレースと施工方法を提案する。

具体的には、木材(Wood)とグラウト(Grout)を鋼管(Steel Tube)内に配した部材(以下、WGFTと呼ぶ)をCFT-SS補強工法の圧縮ブレースに用いる案である。木材は国内外を問わず調達しやすい材料で、コンクリートより比重が小さい。即ち木材を配置することで、部材の軽量化に繋がる。また図2のように、木材を鋼管の中心に配置しているため、WGFTの曲げ剛性は概ねCFTと同程度で、曲げ座屈が先行する耐震補強材として利用する場合は、WGFTはCFTに比して不利にならないと考えられる。ただし、WGFTは3種類の材料で構成される新しい合成構造部材で、その複雑な力学挙動を解明する必要がある。



(a) 従来の補強工法 (b) CFT-SS補強工法
図1 建築耐震補強のイメージ

2. 研究の目的

上述のように、WGFTは3種類の材料で構成される新しい合成構造部材で、その弾塑性挙動を含めた力学特性は明確にされていない部分が多い。また、WGFTの性能に関する計算方法など、実務設計の際に必要なものは確立されていない。

そのため、本研究の目的は、(I)WGFTを圧縮ブレースとして用いるときの性能を載荷実験で検討すること、ならびに(II)WGFTの補強性能に関する計算方法を導き出すことより、WGFTによる耐震補強性能を確立することである。

3. 研究の方法

(1) 研究計画

提案しているWGFTは圧縮力のみ受ける耐震ブレースとして用いるため、本研究ではWGFT試験体に対して中心圧縮実験を行い、WGFTの耐震性能を確認する。また、本研究には、短柱と長柱の2シリーズの試験体を作製して、実験を実施している。短柱試験体は基礎的性状を検討するためのもので、長さ300mm(C3, S3)と600mm(C6, S6)の2種類がある。長柱試験体は実用性状を検討するためのもので、長さ1700mm(C17, S17)と2000mm(C20, S20)と2600mm(C26, S26)の3種類がある。



図2 試験体断面(グラウト充填前)

表 1 短柱試験体の実験・計算結果一覧

Test Specimen	Depth of Wood <i>d</i> mm	Axial Stiffness			Compressive Strength			M.G.
		<i>E</i> <i>A</i> exp MN	<i>E</i> <i>A</i> cal MN	<i>E</i> <i>A</i> exp/ <i>E</i> <i>A</i> cal	<i>N</i> exp kN	<i>N</i> ₀ kN	<i>N</i> exp/ <i>N</i> ₀	
C3-01A	0	263	370	0.71	837	1.05	A	
C3-02A		326		0.88	825	799		1.03
C3-03A		259		0.70	842	1.05		
C3-51A	50	276	338	0.82	731	1.03		
C3-52A		292		0.86	730	712		1.03
C3-53A		284		0.84	636	0.89		
C3-71A	70	258	308	0.84	603	0.96		
C3-72A		270		0.88	587	628		0.94
C3-73A		269		0.87	639	1.02		
S3-01A	0	429	434	0.99	1075	1.11		A
S3-02A		529		1.22	1027	971	1.06	
S3-03A		411		0.95	1002	1.03		
S3-51A	50	422	394	1.07	811	0.94		
S3-52A		427		1.09	700	860	0.81	
S3-53A		399		1.01	807	0.94		
S3-71A	70	376	355	1.06	743	0.99		
S3-72A		374		1.05	681	754	0.90	
S3-73A		355		1.00	736	0.98		
C3-01C	0	190	431	0.44	875	1.03	C	
C3-02C		251		0.58	882	845		1.04
C3-03C		168		0.39	899	1.06		
C3-51C	50	282	381	0.74	742	0.99		
C3-52C		293		0.77	750	747		1.00
C3-53C		305		0.80	726	0.97		
C3-71C	70	290	334	0.87	618	0.95		
C3-72C		312		0.93	636	653		0.97
C3-73C		276		0.82	630	0.96		
S3-01C	0	364	524	0.69	986	0.97		C
S3-02C		327		0.62	1085	1013	1.07	
S3-03C		433		0.83	1080	1.07		
S3-51C	50	301	462	0.65	825	0.93		
S3-52C		344		0.75	894	888	1.01	
S3-53C		337		0.73	884	1.00		
S3-71C	70	340	402	0.85	675	0.88		
S3-72C		387		0.96	700	768	0.91	
S3-73C		259		0.64	611	0.80		
C3-51D	50	429	368	1.17	855	1.10	D	
C3-52D		423		1.15	857	780		1.10
C3-51PD		423		1.15	837	1.07		
C3-52PD	396	1.08	848	1.09				
S3-51D	-	-	-	-	-	-		
S3-52D	449	0.99	1043	984	1.06			
S3-51PD	375	0.83	1066	1.08				
S3-52PD	420	0.93	1066	1.08				
C3-01F	0	517	398	1.30	880	1.11		F
C3-02F		368		0.93	820	791		
C3-03F		523		1.31	887	1.12		
C3-51F	50	452	358	1.26	750	1.08		
C3-52F		382		1.07	749	697	1.08	
C3-53F		428		1.19	764	1.10		
C3-71F	70	350	320	1.09	673	1.11		
C3-72F		414		1.29	671	607	1.11	
C3-73F		391		1.22	607	1.00		
S3-01F	0	465	462	1.01	982	0.99		
S3-02F		480		1.04	1065	997	1.07	
S3-03F		495		1.07	1102	1.11		
S3-51F	50	437	411	1.06	971	1.11		
S3-52F		928		2.26	793	877	0.90	
S3-53F		531		1.29	919	1.05		
S3-71F	70	400	363	1.10	719	0.94		
S3-72F		454		1.25	838	762	1.10	
S3-73F		424		1.17	839	1.10		

表 2 長柱試験体の実験・計算結果一覧

Test Specimen	Compressive Strength			Weight <i>W</i> (kg)	<i>N</i> exp/ <i>W</i> (N/g)	M.G.
	<i>N</i> exp (kN)	<i>N</i> cr (kN)	<i>N</i> exp/ <i>N</i> cr			
C17-01F	499	529	0.94	48	10.3	F
C17-71F	474	415	1.14	39	12.1	
C17-72F	446	415	1.07	39	11.5	
S17-01F	698	737	0.95	57	12.3	
S17-71F	722	553	1.31	46	15.8	
S17-72F	706	553	1.28	46	15.4	
C20-01D	466	494	0.94	55	8.4	
C20-51D	489	463	1.06	49	9.9	
S20-01D	775	716	1.08	66	11.7	
S20-51D	640	659	0.97	59	10.9	
C26-01G	357	407	0.88	70	5.1	G
C26-51G	444	395	1.12	62	7.2	
C26-71G	336	358	0.94	54	6.2	
C26-72G	350	358	0.98	54	6.5	
S26-01G	534	607	0.88	84	6.4	
S26-51G	502	578	0.87	75	6.7	
S26-71G	460	514	0.89	65	7.1	
S26-72G	507	514	0.99	65	7.8	

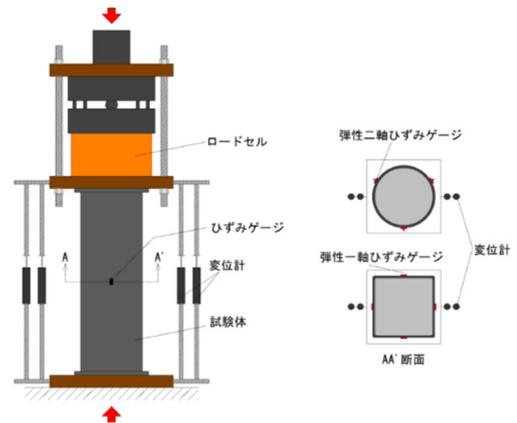


図 3 荷重方法 (短柱)

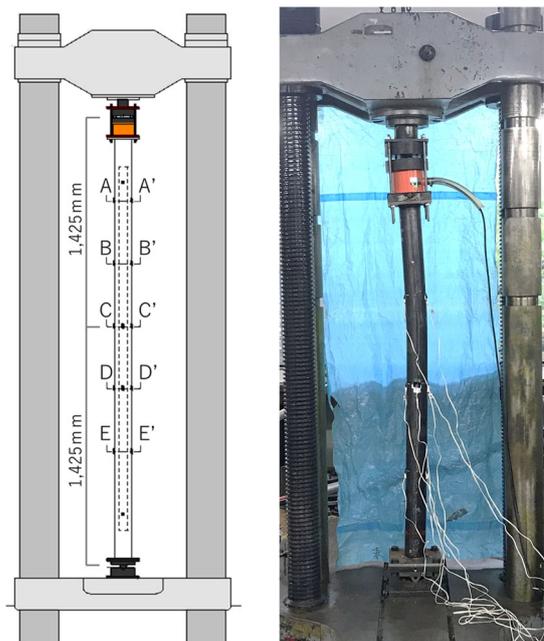


図 4 荷重方法 (長柱)

Test Specimen	Depth of Wood <i>d</i> mm	Axial Stiffness			Compressive Strength			M.G.
		<i>E</i> <i>A</i> exp MN	<i>E</i> <i>A</i> cal MN	<i>E</i> <i>A</i> exp/ <i>E</i> <i>A</i> cal	<i>N</i> exp kN	<i>N</i> ₀ kN	<i>N</i> exp/ <i>N</i> ₀	
C6-01B	0	424	366	1.16	828	842	0.98	B
C6-51B	50	519	336	1.55	701	743	0.94	
C6-71B	70	340	306	1.11	578	648	0.89	
S6-01B	0	416	429	0.97	987	1025	0.96	
S6-51B	50	435	390	1.11	865	898	0.96	
S6-71B	70	394	353	1.12	675	777	0.87	
C6-01E	0	284	448	0.63	871	853	1.02	E
C6-51E	50	-	395	-	-	751	-	
C6-71E	70	297	344	0.86	632	653	0.97	
S6-01E	0	494	530	0.93	1026	1038	0.99	
S6-51E	50	373	462	0.81	970	908	1.07	
S6-71E	70	434	397	1.09	763	783	0.97	

(2) 実験結果と計算結果の考察

短柱の載荷方法は図 3，長柱の載荷方法は図 4 に示すように行い，その結果を表 1 と表 2 にまとめて示す．短柱試験体は計 72 体，長柱試験体は計 18 体があった．表には，本研究で提案した剛性や最大耐力の単純累加による計算値を併記している．

表 1 と表 2 より，試験体の最大耐力の実験値と提案の計算値がよく対応していることがわかる．詳しく比較するために，一例として，D グループの結果を図 5 に示し，図中の実線は提案計算方法による最大耐力の予測値（以下の，カラムカーブ）で，プロットは長柱と短柱の実験結果である．図 5 より，実験結果とカラムカーブを比較すると，ばらつきがあるものの，概ねよく対応しているといえる．

次に，実務設計に近い長柱試験体の圧縮耐力を詳しく検討するため，カラムカーブとすべての長柱試験体の実験値を図 6 に示す．ここで，図 6a)に円形試験体，図 6b)に角形試験体を示す．カラムカーブ（実線），実験値（プロット）ともに，木なしを青，木径 50mm を緑，木径 70mm を橙で色分けしている．

図 6 で，同じ色のカラムカーブとプロット（実験値）を比較すると，緑の●（円形， $l_k/D=28.5$ ，木径 50mm）や橙の■（角形， $l_k/D=19.5$ ，木径 70mm）のようにカラムカーブより大きくなっているものがあるものの，ほとんどのプロットはカラムカーブとの差が 10%程度以下で，計算値は実験値とよく対応しているといえる．また，実験結果から，長柱試験体の l_k/D が大きくなるにつれ，圧縮耐力が下がる傾向が確認できる．

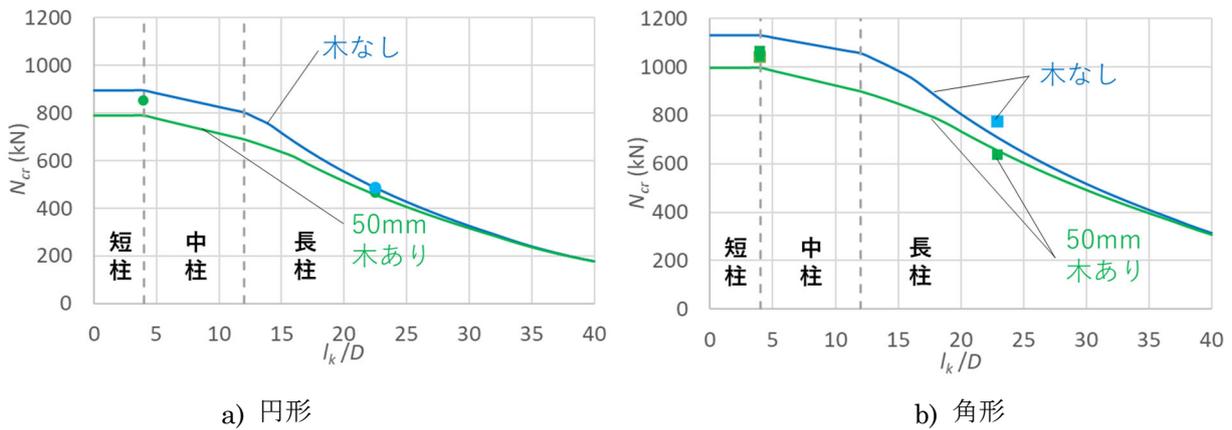


図 5 カラムカーブと実験結果(短柱と長柱の比較)

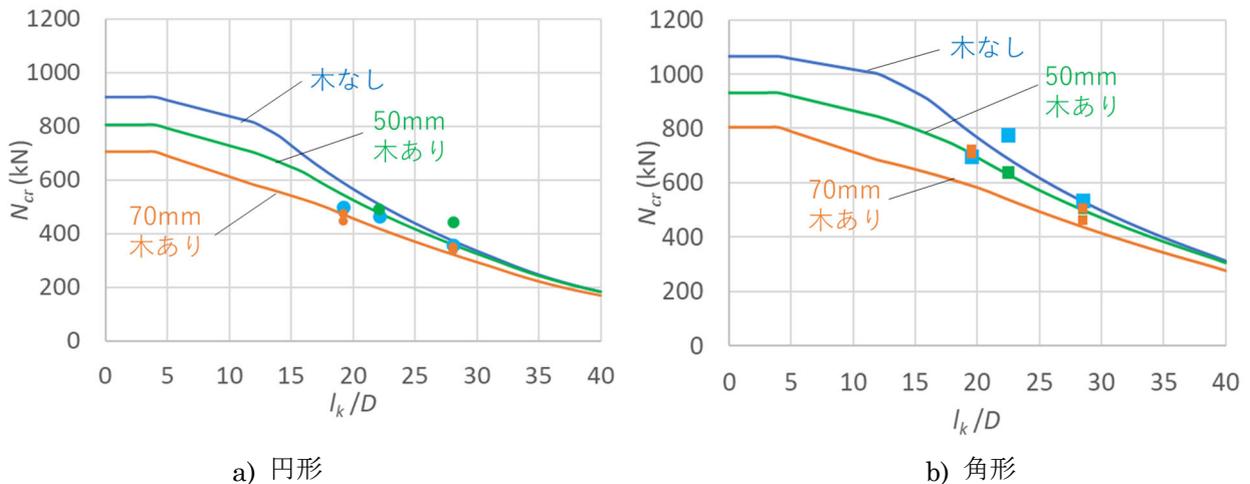


図 6 カラムカーブと実験結果(長柱の比較)

表 3 に長柱試験体の圧縮耐力の実験値/計算値の平均値と標準偏差を形状別に示す．表 3 より，全体で見れば，試験体の形状や長さを問わず，平均値が概ね 1.0 となり，実験値は，累加座屈耐力により精度良く評価

できているといえる。

表 3 平均値と標準偏差

Test Specimen	N_{exp}/N_{cr}	
	Average	Standard Deviation
Circle section (N=9)	1.01	0.09
Square section (N=9)	1.02	0.17
All specimen (N=18)	1.02	0.13

(3) 軽量化と圧縮耐力の関係

耐震補強材として、WGFT 長柱を使用する場合、木材を内蔵することで軸剛性や圧縮耐力の低下が懸念されるが、図 5 と図 6 の予想耐力や実験結果からもわかるように、長柱領域において試験体が長くなるにつれ、木材を内蔵することによる圧縮耐力低下の幅が小さくなることがわかる。

表 2 より、長柱試験体の重量に着目すると、木径 50mm の木材を内蔵することで約 10%の軽量化、木径 70mm の木材を内蔵することで約 20%の軽量化に成功した。一方で、木材内蔵による長柱試験体の圧縮耐力の低下は、殆どが 10%以内で、重量の低下に対する強度の低下は小さいといえる。その結果、比強度は木なしよりも木ありの方が大きく、より小さい重量で高い強度を示すことがわかる。

従って、施工簡便化の観点から、CFT の代わりに、WGFT を圧縮抵抗型耐震補強材として使用することは十分に可能と考えられる。

4. 研究成果

CFT 構造の軽量化を目的にして、充填材に木材とグラウトを使用した構造材 WGFT を提案し、長さ 300mm と 600mm の短柱試験体、1700mm、2000mm、2600mm の長柱試験体を作製し、中心圧縮実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) グラウトから木材への置換率が上がるほど、圧縮耐力は下がる傾向が確認できた。ただし、木材の置換率が同じな場合、試験体が長ければ長いほど、圧縮耐力の低下率が小さくなる。
- 2) WGFT 試験体において、実験耐力を構成要素の累加座屈耐力で評価した場合、一部を除くと 0.96~1.03 で精度良く評価できた。
- 3) WGFT 長柱試験体において、木材を内蔵することで、最大 23%の軽量化ができた。また、圧縮耐力の大幅な低下がみられないことから WGFT の実用性が確認できる。
- 4) WGFT 長柱領域では、座屈耐力が同程度であるため、比強度は木材ありの方が木材なしよりも大きく、より小さい重量で高い強度を示すことがわかった。

以上の成果に基づいて、現在はルーマニアで、WGFT を圧縮ブレースとして、既存構造物の耐震性能向上に用いる計画が進められている。現地での実験ならびに設計に向けての数値解析などが行われている。

参考文献：

- 1) 中原浩之，他：CFTブレースにより耐震補強を施した実在建物 of 静的水平加力実験，日本建築学会構造系論文集，第78巻，第688号，pp.1131-1138，2013.6
- 2) 日本建築総合試験所：建築技術性能証明 評価概要報告書（GBRC性能証明第14-20号），CFT-SS補強工法，－圧縮抵抗型CFTブレース補強工法－，2014.9

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 陳逸鴻, 中原浩之, 坂井実佳子, 笠飯翔平	4. 巻 43(2)
2. 論文標題 鋼管に木とグラウトを充填した合成構造部材を用いた圧縮抵抗型ブレースの開発に関する実験的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 中原浩之, 塚本涼太, 陳逸鴻, 坂井実佳子	4. 巻 42(2)
2. 論文標題 鋼管に木とグラウトを充填した合成構造部材を用いた圧縮抵抗型ブレースの開発に関する予備的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 919-924
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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 M. Sakai, R. Tsukamoto, I. Chan, H. Nakahara
2. 発表標題 Development of Hybrid Braces Composed of Steel Tube, Cement Grout and Lumber for Seismic Retrofitting
3. 学会等名 第17回世界地震工学会議(17WCEE) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tsukamoto, M. Sakai, I. Chan, H. Nakahara
2. 発表標題 Axial Compression Test of Hybrid Member Composed of Steel Tube, Cement Grout and Wood
3. 学会等名 第13回長崎大学・清州大学校科学技術共同シンポジウム (JSST2019) (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------	---------