

令和元年6月26日現在

機関番号：35403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14767

研究課題名（和文）地震後残留変形低減ブレースによる継続的な耐震安全性確保を目指した構造システム

研究課題名（英文）Seismic performance of reduced of residual deformation brace with building structure after earthquake

研究代表者

山西 央朗 (yamanishi, teruaki)

広島工業大学・工学部・助教

研究者番号：40587060

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：地震後残留変形低減ブレース(R-brace)を設置した鋼構造物の地震応答解析により、地震後の残留変形を低減できる可能性を提示した。また、残留変形の発生する場合、一般的なブレース（座屈拘束ブレース）は一方向に変位が蓄積される傾向にあるのに対して、R-braceは各層の最大層間変形角の分布が第一波と同程度となる。このため、構造物の耐震安全性を理解する上で、地震波の繰返し回数に着目して議論できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通常、構造物に残留変形が発生する場合、複数回の地震動を与えると、一方向への変形の蓄積が観察され、連続的に構造物の耐震安全性を検討しなければならない。これに対し、原点立上がり型復元力特性を有するブレースを設置し、構造物全体に同復元力特性を分布させることで、複数回発生する地震動に対して構造物の耐震安全性を地震の回数、すなわち繰返し回数という観点で議論できることを明らかにした。地震応答に対する振動制御として、応答理解の単純化を図れる可能性を提示できた。

研究成果の概要（英文）：The authors are conducting research to clarify the seismic performance of the frame with R-brace. In previous studies, research was conducted experiments of R-brace and numerical analysis of one-storyone-bay frame. In this paper numerical analysis with multi-story-multi-bay is carried out and performance of R-brace is discuss. As a result. The performance of R-brace is restrained residual deformation when the burden is large. Furthermore, it is possible to decreased the increase of residual deformation when even if multi-earthquakes occur, and to restrain occurrence of residual deformation.

研究分野：工学

キーワード：建築構造物 耐震安全性 地震応答 復元力特性 ブレース

様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建築構造物の地震時安定性,並びに性能評価を行う場合においては,紡錘型の復元力特性を付与することが単純かつ取り扱い易い.しかし一方で,当該挙動は,変位と抵抗力との間に位相差が生まれ残留変形を生じる可能性がある.一定値以上となると,二次部材の機能不全や建物使用者の不快感が報告され,地震後,構造物の継続使用が困難なものとなる.また,近年には2016年に発生した熊本地震のように,極めて稀に起こる地震が複数回発生しており,前震に耐えた構造物が本震で倒壊する事例が挙げられている.このように構造物の耐震安全性を確保するためには,残留変形の問題に対して考える必要がある.

2. 研究の目的

残留変形の問題に対しては,“セルフセンタリング性能”と呼ばれる原点指向型の復元力特性が効果的とされ,既往の研究によって明らかとされているが,工法の複雑さ・汎用性に難がある.研究代表者は,比較的簡単に使用できるブレースにセルフセンタリング性能の期待できる地震後残留変形低減ブレース(以後 R-brace と記す)を提案しており,既往の研究よりラーメン架構に R-brace を X 型配置することにより,原点指向型の復元力特性を示し,(図1を参照)残留変形低減効果を有することを明らかとしている.

本研究では,複数回の地震発生時における R-brace 付き架構の地震応答性状を明らかとすることを目的とする.また併せて,一般的に使用される座屈拘束ブレース(以後 BRB と記す)を設置した架構の解析を行い,比較・検討を行い,R-brace の性能について議論する.

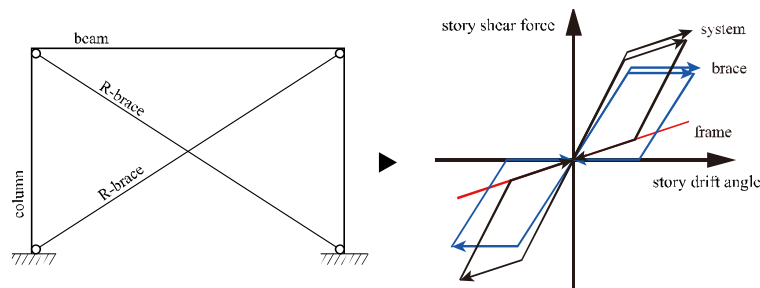


図1 R-brace を X 型配置した際の復元力特性

3. 研究の方法

時刻歴地震応答解析により,耐震安全性を検討する.

(1) 対象構造物

中層鋼構造物を対象として数値解析を行い,複数回の地震発生時における各ブレースを設置した架構の応答を明らかにする.

図2に解析モデルを表1に解析モデルの部材リストを示す.解析モデルは,一般的な中層事務所ビルを想定し,階高が1階4.5m,2~8階4m,スパン長6mの8層3スパンの立体架構である.解析モデルの条件を以下に示す.

- ① 設計用地震力は地域係数 $Z = 1.0$, 設計用一次固有周期 $T = 0.03H$ (H :建物の高さ),地震種別は第2種地盤,標準せん断力係数 $C_0 = 0.2$ とし, A_i 分布に基づいて仮定する.
- ② 本解析モデルの部材重量を除いた床の固定荷重は一般層を $4,470\text{N/mm}^2$,最上階を $6,590\text{N/mm}^2$ とする.積載荷重として,一般層を事務所,最上階を屋上と仮定する.
- ③ 各層の床には剛床を仮定する.
- ④ 柱,梁,ブレースの鋼材種は,それぞれ BCP325, SN490B, SNR490B とし,ヤング係数 $E = 205,000\text{N/mm}^2$,降伏応力度は実勢値を加味して公称値の1.1倍である $\sigma_y = 358\text{N/mm}^2$ とする.
- ⑤ 各層の梁の全塑性モーメントの総和 sM_{pb} に対する軸力を考慮した柱の全塑性モーメントの総和 sM_{pc} の比 sM_{pc} / sM_{pb} が1.5を上回るように設定している.
- ⑥ 図3に架構の剛性の分布を示す.各層の剛性は直線的な分布となっている.

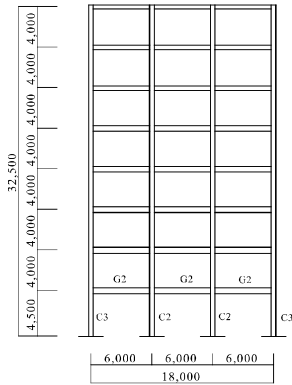
(2) ブレース設定

また,対象とするブレースの,R-brace, BRB の2種類とし,単軸バネによってモデル化を行う. BRB には完全弾塑性型の復元力特性を,R-brace には原点立上り型を再現した bi-linear 型の復元力特性を設定する.またブレースの配置は図4に示すように,各層の外側中央構面に配置し BRB は片流れ方(Z型)に,R-brace は X 型に配置する.表2にブレースの断面リストを示す.架構の剛性に対しブレースが占める剛性の割合を,ブレース系水平力負担率 K_b / K_{sys} (式(i)より算定)とし K_b / K_{sys} が 0.2, 0.4, 0.6 となるようにブレース断面積 A_b を決定し式(ii), (iii)より降伏耐力 T_{by} , 弾性剛性 K_{b0} を入力する.

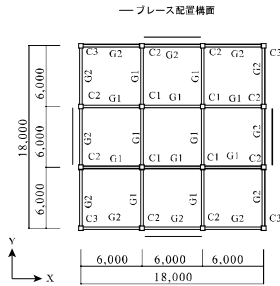
$$\frac{K_b}{K_{sys}} = \frac{K_b}{K_b + K_f} \tag{i}$$

$$T_{by} = A_b \cdot \sigma_y \quad (ii)$$

$$K_b = \frac{E \cdot A_b}{l_b} \quad (iii)$$



(a) 立面図



(b) 平面図

図2 解析モデル

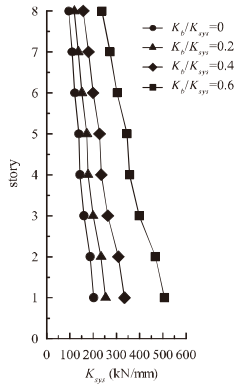
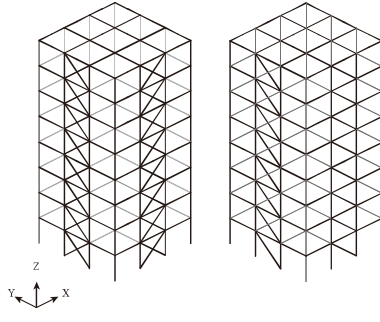


図3 剛性分布



(a) R-brace

(b) BRB

図4 プレース配置

表1 部材リスト

層	柱		梁	
	C1,C2	C3	G1	G2
8			H-400×200×9×16	H-400×200×9×12
7	□-400×400×19	□-400×400×16	H-450×250×9×16	H-400×200×12×22
6				
5				
4	□-400×400×22	□-400×400×19	H-500×200×12×22	H-500×200×12×19
3				
2	□-400×400×25	□-400×400×22	H-600×200×12×25	H-600×200×12×22
1				

表3 固有周期

モデル	固有周期(s)	
	1次	2次
ラーメン架構	1.368	0.476
$K_b/K_{sys}=0.2$	1.235	0.432
$K_b/K_{sys}=0.4$	1.113	0.386
$K_b/K_{sys}=0.6$	0.987	0.331

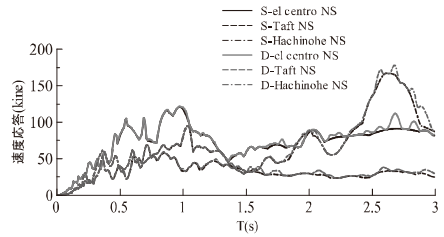


図5 速度応答スペクトル (h=0.02)

表2 プレース断面リスト

層	A_b (mm ²)			K_b (kN/mm)			T_{by} (kN)		
	$K_b/K_{sys}=0.2$	$K_b/K_{sys}=0.4$	$K_b/K_{sys}=0.6$	$K_b/K_{sys}=0.2$	$K_b/K_{sys}=0.4$	$K_b/K_{sys}=0.6$	$K_b/K_{sys}=0.2$	$K_b/K_{sys}=0.4$	$K_b/K_{sys}=0.6$
8	302.4	786.3	1814.4	8.6	22.4	51.6	108.1	281.1	648.7
7	345.4	898.2	2072.7	9.8	25.5	58.9	123.5	321.1	741.0
6	384.5	999.8	2307.2	10.9	28.4	65.6	137.5	357.4	824.8
5	438.0	1138.8	2628.1	12.5	32.4	74.7	156.6	407.1	939.5
4	452.0	1175.3	2712.3	12.9	33.4	77.1	161.6	420.2	969.6
3	506.6	1317.2	3039.6	14.4	37.4	86.4	181.1	470.9	1086.7
2	594.7	1546.3	3568.4	16.9	44.0	101.4	212.6	552.8	1275.7
1	725.1	1885.3	4350.8	19.8	51.5	118.9	259.2	674.0	1555.4

(3) 入力地震波

図5に速度応答スペクトルを示す。入力加速度は、標準3波 (el centro, Taft, Hachinohe)を使用し、各観測波のNS成分をX軸方向にのみ入力する。また、観測波を連続させたものも併せて入力する。更に、R-braceとBRBの性能の違いを明確にするため、最大速度が75kine,100kineとなるように基準化を行う。固有周期は表3に示すように、およそ0.9~1.2の範囲に分布している。

(4) 解析条件

- ① 数値解析にはSNAP.ver6.0(任意形状立体フレーム弾塑性解析ソフト)を使用する。
- ② 数値積分の方法はNewmark-β法(β=0.25の平均加速度法)とする。
- ③ 減衰は瞬間剛性比例型で減衰定数h=0.02とする。
- ④ 地震終了時の残留変形を得るため、1波入力では地震後自由振動が十分に小さくなる100s迄、2波入力の場合には、150s迄解析を行う。

4. 研究成果

(1) 地震動入力が一波の場合

図6に4層の層せん断力-層間変形角関係を示す。まず、 K_b/K_{sys} による影響として K_b/K_{sys} の増加は、保有水平耐力の増加に繋がるため同じ入力波であっても最大層間変形角は低減する

傾向がある。また履歴形状はブレースの履歴特性の支配率が大きくなるため R-brace では原点指向型復元力特性が発現しやすくなる。次に図 6, 7 より R-brace は前述のとおり K_b / K_{sys} が増加するにつれ残留変形は低減していく傾向がある。しかし K_b / K_{sys} が小さく、紡錘型の履歴形状に近い場合にあっては、R-brace を設置しても、最大応答が $1/50\text{rad}$ を超過する場合には大きな残留変形が生じる。

一方、BRB は紡錘型の履歴形状を示すものの、最大応答は R-brace に比較して小さくなるため、残留変形は R-brace と同程度に抑えられる層もある。但し、R-brace と同程度の最大応答が生じた場合においては、残留変形は大きくなる傾向がある。これらは、紡錘型復元力特性がエネルギー吸収効率が良い一方で、残留変形が生じやすいと言う基本的な性状に一致する。

(2) 地震動入力が二波の場合

図 8 に正・負方向最大応答の増大率を、図 9 に残留変形角の増大率を示す。まず、図 6, 7 より (a),(d) は前述のように K_b / K_{sys} が小さく、履歴形状は紡錘型の復元力特性に近い履歴を示す。よって R-brace, BRB は共に、負方向に移行していくため大きな残留変形を生じている。また図 8, 9 に示すように最大応答, 残留変形の増大率は大きい。しかし (b),(c),(e),(f) の場合において R-brace は、残留変形は増加しているものの、二波目の履歴形状が一波目と重複した履歴形状を示すため最大応答, 残留変形の増大率は共に小さい値を示している。一方 BRB は履歴が負方向に移行しており残留変形は増加していく傾向にある。特に (e) については、R-brace と比べ BRB の残留変形の増大率は大きく、大きな残留変形が生じている。

このように K_b / K_{sys} が大きい (e),(f) のようにブレースの履歴形状の支配率が大きい場合、特に R-brace においては、残留変形が抑制できる傾向にある。従って R-brace の本来の履歴形状である図 1 に示す原点指向型の復元力特性が支配的となる履歴形状を示すように R-brace を配置することによって複数回の地震が発生した場合においても、残留変形の発生を抑制することができ、BRB のように変位が一方方向に移行することを防ぐことが可能である。結果として残留変形の増加を抑制できると考えられる。

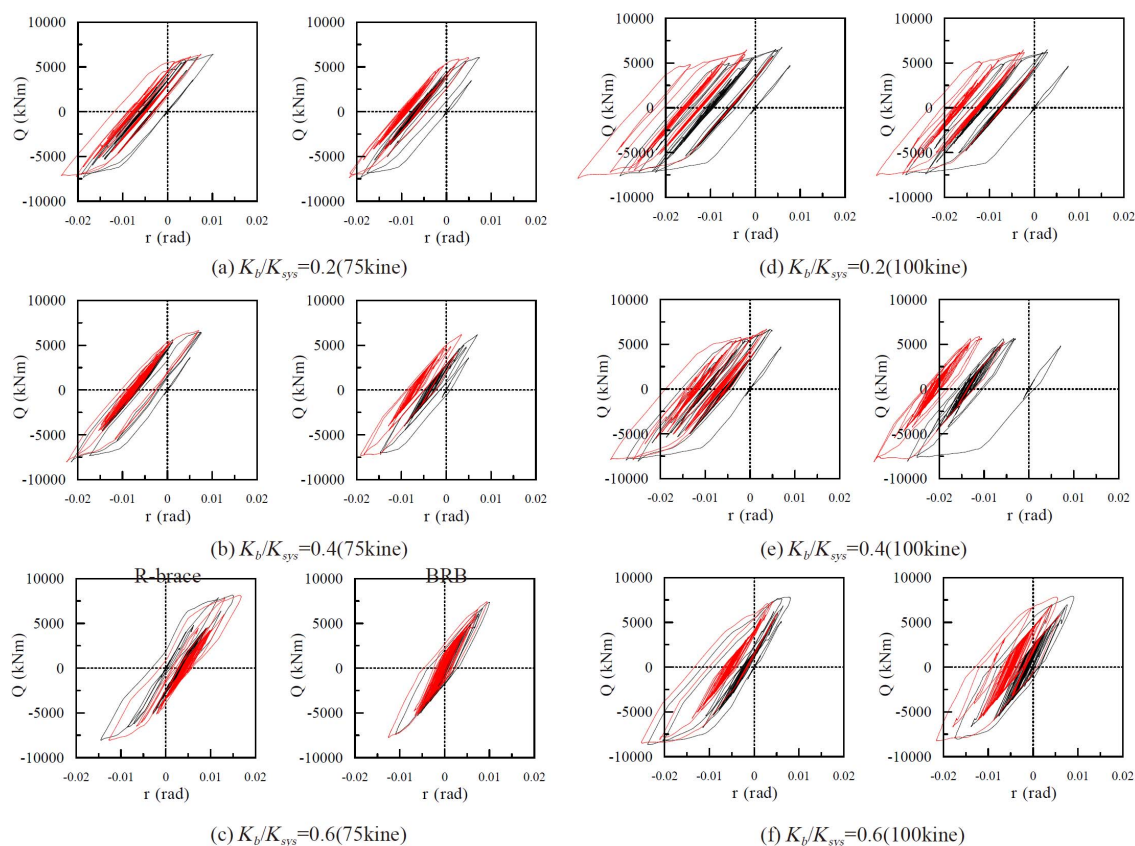


図 6 層せん断力 - 層間変形角 (第 4 層)

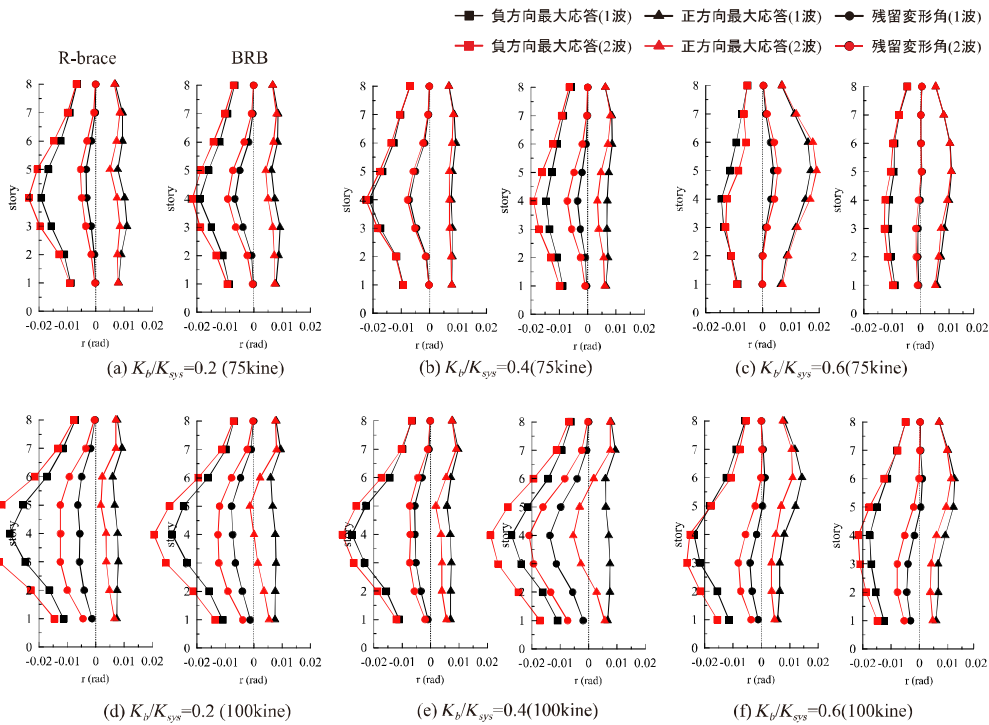


図7 正負方向の最大応答, 残留変形角分布

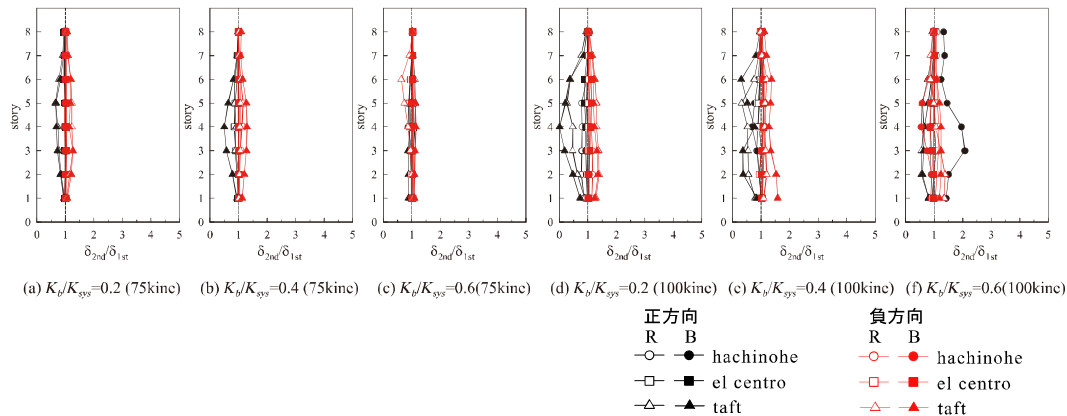


図8 正負最大応答の増大率

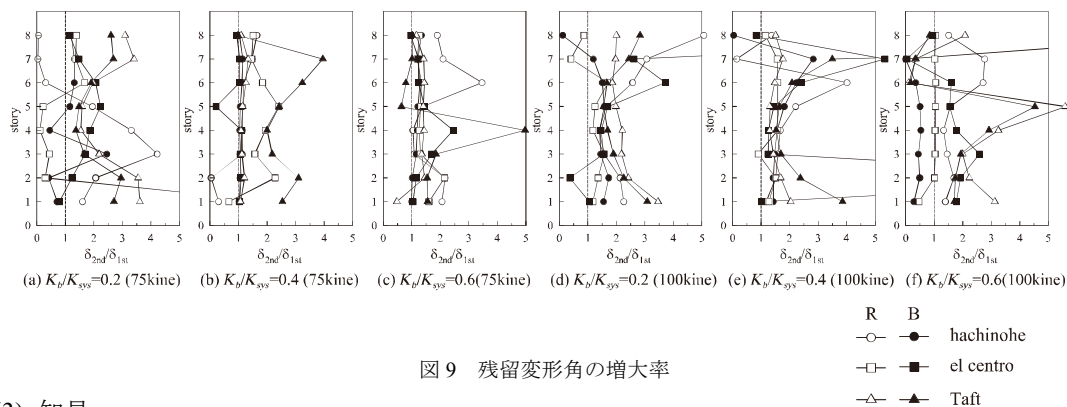


図9 残留変形角の増大率

(3) 知見

R-brace を設置した 8 層鋼構造架構の時刻歴地震応答解析により, 以下 2 点の知見を得た.

- ① ブレースの履歴形状の支配率が大きい場合($K_b / K_{sys} = 0.4, 0.6$)においては, 最大応答が $1/50\text{rad}$ を超過する場合であっても残留変形を抑制できる傾向にある.
- ② ①のように K_b / K_{sys} が大きい場合には, 複数回の地震を受けても, BRB のように一方向に移行することなく一波目と重複した履歴を示すため, 残留変形の増加率は小さく, 発生を抑制できる傾向にある.

これまでの研究成果を総括すると, 構造物に残留変形が発生する場合, 複数回の地震動を与える, 一方向への変形の蓄積が観察され, 連続的に構造物の耐震安全性を検討しなければならない. これに対し, 原点立上がり型復元力特性を有するブレースを設置し, 構造物全体に回復元力特性を分布させることで, 複数回発生する地震動に対して構造物の耐震安全性を地震の回数, すなわち繰返し回数という観点で議論できることが明らかとなった.

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計 03 件）

1. 山西央朗, 山田裕也, 清水斉, 小松真吾, 原点立上り型復元力特性を有するブレースを設置した鋼構造架構の複数回地震時の地震応答, 日本建築学会, 中国支部研究報告集, 第 42 巻, pp. 223~226, 2019.3.
2. 山西央朗, 山田裕也, 清水斉, 小松真吾, 原点立ち上がり型復元力特性を有するブレースを設置した 8 層 3 スパン立体架構の地震応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp. 871~872, 2018.8.
3. 山西央朗, 山田裕也, 清水斉, 小松真吾, 原点立ち上がり型復元力特性を有するブレースを設置した 8 層 3 スパン立体架構の地震応答解析, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 41 巻, pp. 177~180, 2018.3.

6. 研究組織

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：小松 真吾

ローマ字氏名：komatsu shingo

研究協力者氏名：山田 裕也

ローマ字氏名：yamada yuya

※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。