

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04688

研究課題名(和文)鉄筋コンクリート造2次壁付き部材の弾塑性解析手法の構築に関する基礎研究

研究課題名(英文)Fundamental Study on Modeling of Reinforced Concrete Member with Secondary Walls in Non-linear Frame Analysis

研究代表者

松井 智哉 (Matsui, Tomoya)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20402662

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)：鉄筋コンクリート造2次壁付き部材を有する架構の弾塑性フレーム解析手法の構築に向けた基礎的研究として、袖壁付き柱の構造実験による剛性、変形状の把握と袖壁付き柱の解析モデルの評価精度の分析を行った。実験による比較から、菅野式を準用した手法(評価法1)では降伏時変形を大きく評価する結果となり、耐力壁モデル(評価法2)を用いた手法では実験結果と概ね一致した。評価法2の方が評価法1と比べてよい対応を示すが、試験体によっては降伏時の変形を過大評価する場合がある。既往の実験の分析から菅野式による降伏時剛性低下率の推定精度に及ぼす要因として、引張鉄筋比が小さくなる試験体ほど過小評価となることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄筋コンクリート構造における非構造壁は、地震時に損傷を受けた際、耐力性能の著しい低下につながるものではないが、継続使用の観点からより合理的な設計が望まれる。本研究では、非構造壁が取り付く部材および建物の非線形フレーム解析のモデル化手法におけるモデル化手法の構築に向けた研究であり、耐震壁のモデル化手法に準じた手法で復元力特性を概ね評価できることを示すとともに、菅野式に準じた手法では降伏時の変形を過大評価する要因について明らかになった。今後の復元力特性の評価精度向上に役立つ知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：As a fundamental study for the development of non-linear frame analysis method for RC structures with a secondary-walls, structural characteristics of RC column with wing walls were grasped by the test and the evaluation accuracy of the analytical model of columns with wing walls was examined. From the comparison of experimental results and analytical results, the modeling method using the Sugano formula (method 1) greatly evaluated the deformation at the yield of skeleton curve, and the modeling method using the shear wall model (method 2) was almost in agreement with the experimental result. Method 2 showed a better evaluation than method 1, but depending on the test specimens, the deformation at yield could be overestimated. From the analysis of the previous experiments, it was found that the factor affecting the estimation accuracy of the stiffness reduction factor at yield by the Sugano formula is underestimated as the tensile reinforcing ratio becomes smaller.

研究分野：建築耐震構造

キーワード：鉄筋コンクリート構造 袖壁付き柱 静的加力実験 復元力特性 降伏時剛性低下率 マルチスプリングモデル

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。

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート造建物においては柱および梁の構造躯体に袖壁、腰壁、方立壁などの壁板（以下、2次壁）が取り付く場合が多い。このような建物に対して弾塑性フレーム解析によって耐震性能の評価をする際には、2次壁付き部材の断面形状が多様であること、さらにそれらの部材で構成される架構も様々となることから、モデル化において多くの工学的な判断が必要となる。しかしながら、精度がよくかつ汎用性のあるモデル化手法の確立には至っていないのが現状である。このようなことから本研究課題では、2次壁付き部材を有する架構の弾塑性フレーム解析手法の構築することを最終目標としている。

2次壁付き部材の設計上の取扱いとして、モデル化が煩雑となることや、近年の大地震による被害より倒壊は免れるものの2次壁の損傷が目立ち継続使用が困難な事例が見られることから、2次壁の損傷を抑えるために柱・梁と2次壁の境界に構造スリットを設けて絶縁することが多い。これは2次壁部自身の靱性が乏しく小さい変形レベルで損傷が生じることに起因する。そのため昨今では2次壁にスリットを設けた架構実験などが実施され有効性について検証されている。

その一方で、2次壁付き部材は剛性および耐力を向上させる点に利点があることから、構造要素として有効利用するために復元力特性の評価法および限界変形量の定量的評価法の研究がなされている。しかしながら、降伏時剛性低下率の評価式では精度のばらつきが大きいなどの課題もある。また、2次壁付き部材で構成される架構の保有水平耐力の評価を考えた場合、先に述べたように2次壁部は靱性が乏しいため、架構が崩壊メカニズムに至る前に耐力劣化が生じる。精度よく架構の保有水平耐力を評価するためには、この耐力劣化を考慮したモデル化手法が必要である。そのためには、部材の骨格曲線をトリリニアモデルなどで置き換えるにしても終局限界変形の評価が必要であるが、これも現状において提案されている評価式では精度の面で十分とは言えない。部材の曲げ特性をモデル化する手法としてMSモデル（Multi-springモデル）があり、このモデルではコンクリートの材料特性に基づく応力低下を考慮することにより一義的に部材の耐力低下を表現することができる。かつ架構の弾塑性解析では軸力によって随時変化する復元力特性、すなわち軸力-モーメントの相互作用をモデル上で表現できる利点がある。ただ、このような利点の反面、MSモデルでは、非ヒンジ領域の剛性低下、鉄筋の抜け出し・付着すべりなど付加変形は直接的な考慮はできないため、材料ばねの構成則、塑性ヒンジ長さによって間接的に評価せねばならず、これらの付加変形を評価した統一的なモデル化手法には至っていないのが現状である。そのためMSモデルは研究ベースでは一般的な解析手法であるが、上記の利点を持ちながら実設計においては用いられ難いものとなっている。

2. 研究の目的

本研究では、2次壁付き部材を有する架構の弾塑性フレーム解析手法の構築することを目標とし、その基礎的研究として（1）袖壁付き柱の解析モデルの評価精度の分析、（2）袖壁付き柱の構造実験による剛性、変形性状の把握と（2）2次壁付き部材の弾塑性フレーム解析に用いる部材モデルの提案とその妥当性について検討を行う。特にモデル化手法の検討においては、降伏時の変形に着目して精度の検証と考察を行う。なお、本課題では代表的な2次壁付き部材として袖壁付き柱を対象に研究を進めることとする。

3. 研究の方法

1) 袖壁付き柱の解析モデルの評価精度の分析

既往の実験的研究試験体を対象にして、袖壁付き柱の各種構造変数が解析モデルの算出結果に及ぼす影響と要因分析を行う。ここでは、菅野式を準用した降伏時剛性低下率の特性について分析を行う。

2) 袖壁付き柱部材の構造性能の把握と検証用データの取得

破壊形式、シアスパン比を変数とした袖壁付き柱の静的加力実験を実施し、部材の剛性、耐力性能、変形挙動（変形成分）および損傷性能を把握し、モデル化手法の提案に向けて変形挙動などの詳細な実験データを取得および分析を行う。

3) モデル化手法に関する検討

弾塑性フレーム解析に用いる2次壁付き部材のモデル化手法を提案するとともに、1)および2)の成果を含めてモデル化手法の妥当性について検討する。具体的には菅野式を準用した復元力特性モデルと耐震壁のモデル化手法を用いた袖壁付き柱の復元力特性モデルの整合性について検討する。

3.1 実験概要

表1に試験体概要、図1に試験体配筋図を示す。試験体は5階建て共同住宅の外構面に配置された部材を想定し、約1/2スケールの袖壁付き柱4体である。2020年度の実験は、曲げ破壊型となるように計画し、シアスパン比を実験変数とした。2021年度の実験は実験変数を破壊形式として試験体CW2sはせん断破壊型、試験体CW2fは曲げ破壊先行型となるように計画した。

表 1 試験体一覧

試験体		CW1a	CW1b	CW2s	CW2f
柱	柱断面 $b \times D$ (mm)	420×480		420×480	
	柱全長 l (mm)	1700		1700	
	主筋	12-D19 (SD345) $p_t=0.64\%$		12-D19 (SD345) $p_t=0.64\%$	
	帯筋	4-D10@75 (SD295) $p_w=0.91\%$		3-D10@75 (SD295) $p_w=0.30\%$	
壁	袖壁長さ (mm)	480 (両側共通)		480 (両側共通)	
	厚さ t (mm)	120		120	
	縦横筋	D6@100 ダブル (SD295) $p_s=0.53\%$		D6@200 チドリ (SD295) $p_s=0.26\%$	
	端部縦筋	4-D10 (SD295)		2-D10 (SD295)	
柱軸力比		0.1		0.1	
軸力 (kN)		609	528	476	522
シアスパン(シアスパン比)		1440mm (1.00)	2450mm (1.70)	850mm (0.59)	1700mm (1.18)
備考		2020 年度実施		2021 年度実施	

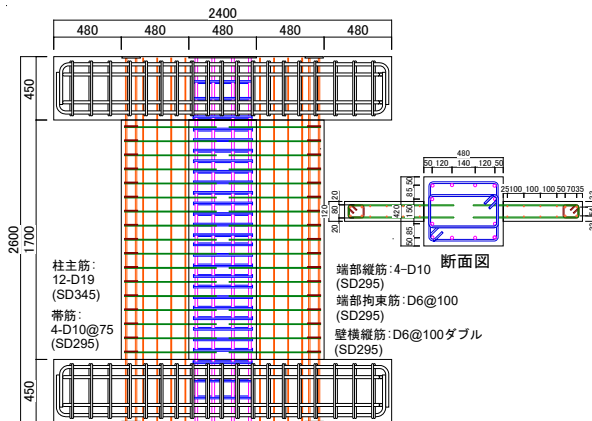


図 1 試験体配筋図 (CW1a, CW1b)

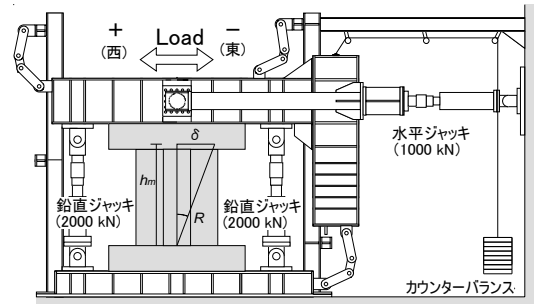


図 2 荷重装置

試験体の柱断面は 420×480mm、袖壁長さは 480mm、壁厚は 120mm である。袖壁端部には拘束筋を設けている。

試験体は図 2 に示す荷重装置に設置し、静的漸増繰り返し水平力荷重を行った。また、2 台の鉛直オイルジャッキにより柱軸力比 $N / (bD\sigma_B)$ を 0.1 とし、算出した一定軸力を試験体には作用させると同時に所定のシアスパン比となるように作用せん断力に対応させて当該鉛直ジャッキにより試験体頂部に付加モーメントを作用させた。水平力荷重は変形制御とし、上下スタブの相対変位 δ と変位計測高さ h_m で与えられる相対変形角 $R (= \delta / h_m)$ で、 $R=0.0625, 0.125\%$ rad. を 1 サイクルずつ、0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 および 4.0%rad. を 2 サイクルずつ繰り返した後、5.0%rad. の正荷重まで行った。

3.2 袖壁付き柱の解析モデルの評価精度の分析

袖壁付き柱の各種構造変数が解析モデルの算出結果に及ぼす影響と要因分析を行う。検討方法の詳細は 4 章で述べる。

4. 研究成果

4.1 材端ばねモデルによる復元力特性の評価

静的荷重増分解析に用いる袖壁付き柱の復元力特性の評価法として、次のモデル化手法により算出した復元力特性と実験値との比較を行い、その適用性について検討を行う。

1 つ目の評価法は、技術解説書¹⁾で示されている袖壁付き柱の評価法を用いる。復元力特性を曲げひび割れモーメントと終局曲げモーメントを折れ点としたトリリニアでモデル化する。降伏時の変形は、剛性低下率によって評価する。剛性低下率 α_y は袖壁付き柱の引張鉄筋比 p_t と有効せい d を定義することにより柱および梁の剛性低下率の算定式である菅野式(1)式)を準用する方法¹⁾を用いる。

$$\alpha_y = \left(0.043 + 1.64 n p_t + 0.043 \frac{a}{D} + 0.33 \eta_0 \right) \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad (1)$$

2 つ目の評価法は、曲げ変形およびせん断変形に対する復元力特性をどちらも非線形としてトリリニアでモデル化し、足し合わせたものを全体の復元力特性とする。降伏時の剛性低下率は、技術解説書¹⁾で示されている耐震壁を対象とした算定方法に準じる。曲げ変形の降伏時剛性低下率は(2)式で算出する。このとき実験結果を勘案し、引張側の柱主筋が降伏しずみに達したときの状態を曲げ降伏として算出した。せん断変形の剛性低下率は(3)式で算定する。

$$\alpha_y = \frac{M_u c_n}{E_c I_e \varepsilon_y} \quad (2)$$

$$\beta_u = 0.46p_w \sigma_y / F_c + 0.14 \quad (3)$$

ここでは、試験体 CW1a の計算結果と実験結果の比較を示す。評価法 1 においては降伏時の変形が実験値よりも大きく、剛性低下率の実験値は計算値の 1.8 倍である。文献 2) では、菅野式の準用による降伏時剛性低下率の評価において、実験値に対する計算値の比の平均値は 1.49 となることが報告されており、今回の試験体でも過小に評価することとなった。耐力壁に対する評価を準用した評価法 2 については、図 2 をみると全体変形、曲げ変形およびせん断変形といずれの復元力特性をみても概ね評価できている結果となった。他の試験体については、評価法 1 による降伏時変形角は試験体 CW1a と同様に実験結果よりも大きい値となっており対応していない。評価法 2 の場合は、評価法 1 に比べると実験値に近いが、過大評価となっている。降伏時の変形を過大評価する（剛性低下率を過小評価）理由については今後も継続して分析を進める。

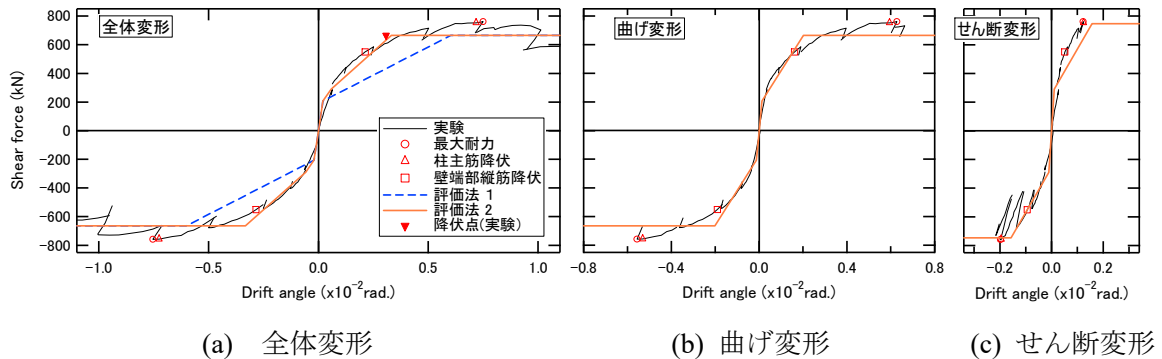


図 2 復元力特性の比較（試験体 CW1a）

4.2 Multi-spring モデルによる復元力特性の評価

本節では 4.1 節と同じく静的荷重増分解析に用いる袖壁付き柱のモデル化として、モーメントと軸力の相関を考慮できる Multi-Spring モデル（以下、MS モデル）によるモデル化手法について検討した結果を示す。解析モデルの概要は次のとおりである。

コンクリートの応力-ひずみ関係の上昇域は、第 1 折れ点をコンクリートの圧縮強度の 0.3 倍とするトリリニアで表現し、圧縮強度時のひずみは 0.002、圧縮強度到達後は応力低下を考慮する。コンクリートの引張応力は無視している。鉄筋については 2 つのモデルを用いた。Model 1 では鉄筋はバイリニアでモデル化した。Model 2 は鉄筋の抜け出し変位を考慮したもので、抜け出し変位を塑性ヒンジ長さ領域でのひずみに換算し、降伏時のひずみ量に加えてトリリニアでモデル化を行った。抜け出し変位は文献 3) に示される手法を用いた。塑性ヒンジ長さについては、実験結果より壁脚部の領域で曲げ変形の 8 割を負担していることを勘案し、320mm とした。

図 3 に水平荷重と変形角の関係の比較を示す。Model 2 と Model 1 を比較すると、顕著な違いではないが、鉄筋の抜け出しを考慮した Model 2 が実験結果と近くなっている。曲げ耐力計算値に達する位置では、Model 2 の変形量は Model 1 に比べて 1 割ほど大きくなっており、実験結果より算出した鉄筋の抜け出しによる変形が全体の変形の 1 割程度であったことを反映できている。

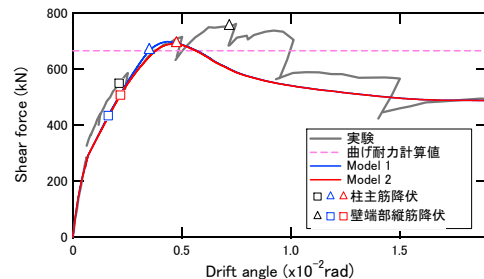


図 3 水平荷重-変形角関係の比較

4.3 袖壁付き柱の解析モデルの評価精度の分析

評価法 1 として示した既存の評価式(1)式では降伏時剛性低下率を過小評価となることが確認された。ここでは、この過小評価となった要因を探るため、既往論文の袖壁付き柱の構造実験試験体を対象に実験による降伏時剛性低下率（以下、 α_y ）と(3)式による α_y の比較を行い適用性について分析を行った。

対象とする試験体は本実験と文献から収集した曲げ破壊型 14 体、せん断破壊型 14 体の計 28 体の両側袖壁付き柱である。腰壁垂れ壁付きは含めていない。各試験体の実験による α_y は、荷重-変形角関係の画像から読み取った最大耐力の 0.8 倍の点における割線剛性を初期剛性の計算値で除した値とした。

図 4 に降伏時剛性低下率の実験値と計算値の比較を示す。計算値に対する実験値の比の平均値は 1.29、変動係数は 26% となり、実験値の剛性低下率は計算値に比べて大きい傾向がある（図

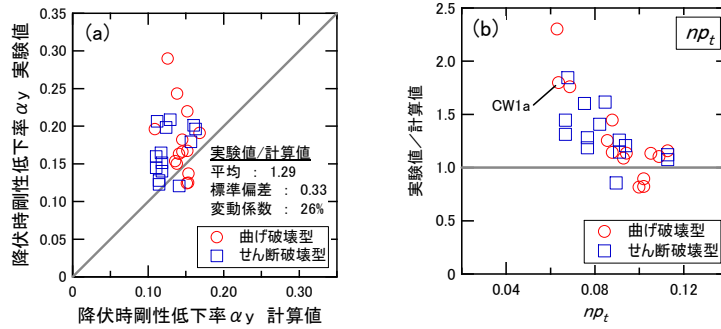


図4 降伏時剛性低下率の実験値と計算値の比較

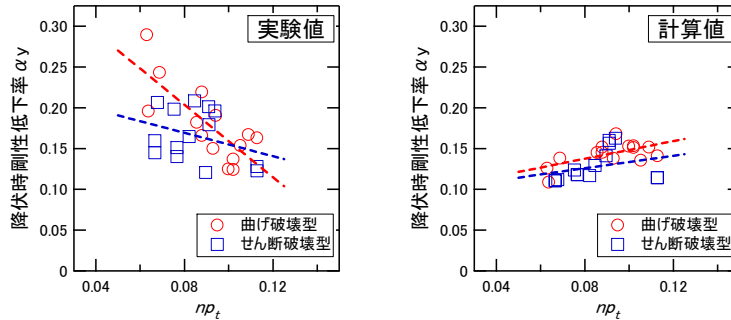


図5 引張鉄筋比が降伏時剛性低下率に及ぼす影響

4(a)。図4(b)をみると np_t が小さくなるほど α_y を過小評価する傾向がある。図5に α_y の計算値および実験値と np_t の関係をそれぞれ示す。図には回帰直線を併せて示している。 α_y の実験値は np_t が大きくなるほど減少するが、計算値は増加する傾向にあることが確認でき、このことが図4(b)に示すような評価精度に影響を及ぼしているといえる。

α_y の減少の理由として袖壁厚は柱幅に比べて小さいため鉄筋群が引張降伏に至るまでに圧縮側袖壁のひずみも大きくなり剛性低下の度合いも大きくなることなどが考えられる。式(3)に含まれる他の変数については、 α_y の推定精度に及ぼす影響は読み取れなかった。

本検討は限られた試験であること、 np_t のみを変数とした実験は含まれていないことから、他の構造変数も含めて解析的に剛性低下率に影響を及ぼす要因を今後分析していく。

4.4 まとめ

本課題の実験試験体における比較から、菅野式を準用した手法(評価法1)では降伏時変形を大きく評価する結果となり、耐力壁モデル(評価法2)を用いた手法では実験結果と概ね一致した。評価法2の方が評価法1と比べてよい対応を示すが、試験体によっては降伏時の変形を過大評価する場合がある。今後、過大評価となる要因について解析などにより検討をする必要がある。

Multi-springモデルを用いた復元力特性の評価では、実験結果から、曲げ変形を大部分を占める壁脚部の領域を塑性ヒンジ長さとして使い、鉄筋の抜け出しを考慮することで実験結果との対応する結果が得られた。解析で用いる塑性ヒンジ長さの定量的に算出する方法を今後検討していく必要がある。

既往の実験の分析から菅野式による降伏時剛性低下率の推定精度に及ぼす要因として、引張鉄筋比が小さくなる試験体ほど過小評価となることが明らかとなった。今後、引張鉄筋比が復元力特性に及ぼす影響を解析的に分析していく。

【参考文献】

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：2015年版建築物の構造関係技術基準解説書，付録1-3 鉄筋コンクリートに関する技術資料，pp.648-660，pp.672-681，2015
- 2) 向井智久，渡邊秀和，坂下雅信ほか：実験データベースを用いた鉄筋コンクリート造部材の構造特性評価式の検証(2020年版)，建築研究所，2020
- 3) 日本建築防災協会：2017年度改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説，2017

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 能瀬 鮎美
2. 発表標題 シアスペン比が異なる鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の静的加力実験 その1 実験計画と荷重 - 変形角関係
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木 菜月
2. 発表標題 シアスペン比が異なる鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の静的加力実験 その2 変形状と復元力モデル
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木 菜月
2. 発表標題 二次壁を有する鉄筋コンクリート造建物の耐震性能に関する基礎研究
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松井 智哉
2. 発表標題 RC造袖壁付き柱の構造実験と降伏時変形の評価に関する考察
3. 学会等名 2022年度日本コンクリート工学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大勝圭輝
2. 発表標題 破壊形式の異なる鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の静的加力実験
3. 学会等名 2022年度日本コンクリート工学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松井智哉
2. 発表標題 破壊形式の異なる鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の実験的研究 その1：実験計画と荷重-変形角関係
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大勝圭輝
2. 発表標題 破壊形式の異なる鉄筋コンクリート造袖壁付き柱の実験的研究 その2：変形性状と復元力特性モデル
3. 学会等名 2022年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022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
研究分担者	齊藤 大樹 (SAITO TAIKI) (00225715)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (13904)	

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