

令和元年6月11日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06572

研究課題名(和文)大地震後の継続使用性を有するプレストレストコンクリート連層耐震壁の構造性能

研究課題名(英文) Seismic Performance of Multi-story Prestressed Concrete Walls with Function Continuity after Large Earthquake

研究代表者

谷 昌典 (Tani, Masanori)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50533973

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、損傷制御型の構造システムの一つであるプレキャスト・プレストレストコンクリート(PCaPC)構造を対象に、PC鋼材の付着有無および壁端部配筋を実験変数とするPC連層耐震壁試験体4体に対する構造実験を実施し、得られた実験データの分析および解析ツール(骨組解析)を用いた構造性能評価を行った。PC連層耐震壁部材の構造性能を明らかにするとともに、実建築物に適用するための設計法を確立するために必要となる知見を収集した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により得られたPC造耐震壁部材の実験データや構造性能に関する知見が、規準や指針の改訂に反映されて広く一般に公開されて、構造設計の場において活用されれば、本構造形式が災害時に特に重要な建築物となる庁舎や病院等に広く適用されることで、地震後にも災害拠点としての機能を失うことなく継続して活動できることから、より災害に強い社会の構築に大きく貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Precast prestressed concrete (PCaPC) structure which is one of the damage-controlled structural systems was targeted in this research. Four multi-story PCaPC wall specimens whose experimental parameters were grouting for prestressing tendons and detail of boundary element were constructed and tested. Structural performance of multi-story prestressed concrete wall members were clarified based on discussions on obtained experimental data and prediction of structural behavior by using frame analysis. Information for establishing structural design of actual buildings was also obtained.

研究分野：建築構造

キーワード：プレストレストコンクリート プレキャストコンクリート 耐震壁 アンボンド 限界状態

## 様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災では、災害時に拠点となるべき庁舎等の重要建築物において、構造部材や非構造部材に大きな損傷が発生し、継続使用が不可能となった事例が多数確認され<sup>1)</sup>、大地震時の構造安全性だけでなく、地震後の継続使用性の重要性も改めて問われる事態となった。プレキャスト部材をプレストレス力により圧着することで架構を構築するプレキャスト・プレストレスコンクリート（以下、PCaPC）構造は、プレストレス力により予めコンクリートに圧縮力を作用させることで、地震後の残留変形や残留ひび割れが小さくなり、大地震に対して主要構造部材の損傷をごく僅かなレベルに抑えられることから、地震後の継続使用性を議論する上では非常に有利な構造形式である。特に、高い剛性と耐力を確保できるアンボンド PCaPC 耐震壁は、米国などの諸外国で特に大きな注目を集めており、壁体の剛体回転挙動を活用して、部分的に付着を除去した普通強度鉄筋をダンパーとして壁脚部の接合目地を貫通するように埋め込む形式や鋼材ダンパー等を外付けする形式により、エネルギー吸収性能を付与する手法が提案されている。日本では、2007年の法改正により、アンボンド PC 部材の耐震部材への使用が可能となったが、限界耐力計算や PC 鋼材破断時の安全性確保が要求されることから、実建築物への普及は進んでいない。実建築物への適用の可能性も勘案すると、実験例が極めて少ないボンド PC 耐震壁についても検討を行い、アンボンド PC 耐震壁も含めて国内の設計体系に対応した設計法を確立する必要がある。また、曲げ挙動が支配的となる連層耐震壁では、壁端部の拘束領域の挙動が変形性能に大きな影響を及ぼすことは、過去の地震被害<sup>2)</sup>が示す通りであり、特に、端部コンクリートの圧壊は、剛性低下や残留変形の増大を招き、地震後の継続使用性に悪影響を及ぼすことから、これを適切に抑制する手法の検討が不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究では、損傷制御型の構造システムの一つである PCaPC 構造を対象に、PC 連層耐震壁部材の構造性能を明らかにし、実建築物に適用するための設計法を確立するために必要な知見を収集することを目的として、連層耐震壁部材をモデル化した構造実験を実施し、得られた実験データの分析および解析ツールを用いた構造性能評価を行う。国内の実建築物への適用可能性も勘案して実験例が極めて少ないボンド PC 耐震壁を主な研究対象とする点と、ダンパーとして部材内に設置する普通強度鉄筋および壁端部の圧縮力を適切に負担させる芯鉄筋を含む、壁端部拘束領域の配筋を実験変数として、これらが変形性能および損傷に及ぼす影響を検証する点が特徴である。

### 3. 研究の方法

本研究は、実験により PCaPC 連層耐震壁の構造特性に関する知見を収集するほか、得られた実験データに基づき、解析ツール（骨組解析）における適切な材料構成則や解析モデルについて検討し、耐震壁の剛性、特性点の耐力及び変形に関する評価手法を構築する。

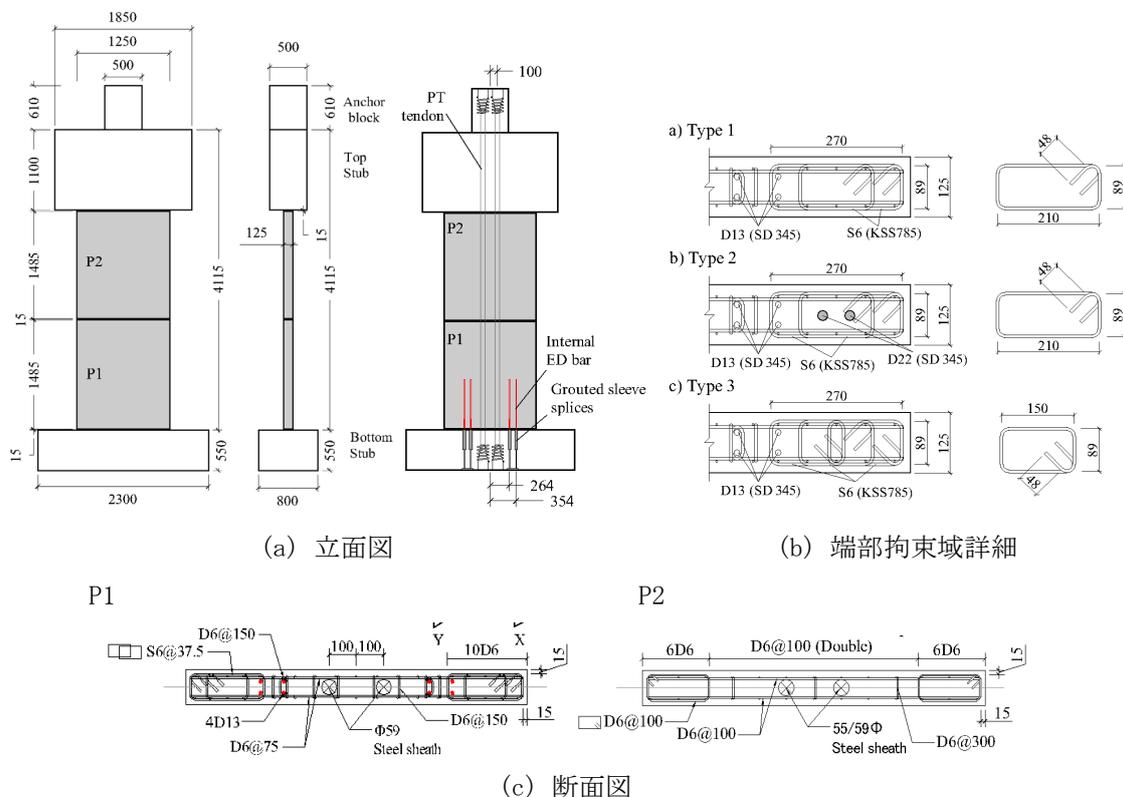
#### (1) 実験による構造特性データの収集

本実験で使用した試験体は片持ち形式の PCaPC 耐震壁試験体で、PC 鋼材の付着の有無、壁端部配筋を実験変数とする 4 体である。試験体概要および試験体図を表 1 および図 1 にそれぞれ示す。試験体は 2 枚の壁板パネル P1, P2（いずれも断面 125mm×1250mm、長さ 1485mm）を厚さ 15mm の高強度無収縮モルタル目地を介して上下スタブに圧着接合して作成した。BPT-IA-c のみプレストレス導入後にシース内にグラウトを施工した。また、いずれの試験体も P1 脚部に長さ 150mm のアンボンド区間を有するダンパー鉄筋 4-D13（SD345）を配し、下スタブに機械式継手により定着させた。壁端部拘束筋はいずれも 125mm×270mm で、UPT-IC のみ 6-S6@37.5（KSS785）、他の 3 体は 4-D6@37.5（KSS785）とした。また、UPT-IB のみ壁端部拘束域内に芯鉄筋として 2-D22（SD345）を配した。

表 1 試験体概要一覧

試験体名	BPT-IA-c	UPT-IA-c	UPT-IB	UPT-IC
壁断面 (mm)	125×1250			
せん断スパン (mm)	3265			
壁筋 (タテヨコ共)	D6 ダブル@75 (SD295A)			
端部 拘束 域	断面	Type1		Type2
	寸法 (mm)	125×270		
	拘束筋	4-S6@37.5 (KSS785)		6-S6@37.5 (KSS785)
	芯鉄筋	—	—	2-D22 (SD345)
ダンパー鉄筋	4-D13 (SD345)			
PC 鋼材	配筋	2C-3-φ15.2 (SWPR7BN)		2C-3-φ15.2 (SWPR7BL)
	グラウト	有		無
	有効緊張力 (kN)	275	293	391
軸力 (kN)	469			
コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	79.6	83.8	74.0	81.2

載荷装置図を図2に示す。1000kN鉛直ジャッキ2本により圧縮軸力469kNを一定に保持しながら、3000kN水平ジャッキにより水平力を作用させた。載荷は水平力作用位置（壁脚部から高さ3265mm）における水平変位を同高さで除した部材角Rにより制御した。水平力は正負交番繰り返し載荷とし、 $R=\pm 1/1600$ を1回、 $R=\pm 1/800$ 、 $\pm 1/400$ 、 $\pm 1/200$ 、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/50$ 、 $\pm 1/33$ 、 $\pm 1/25$ 、 $\pm 1/20$ を2回ずつ繰り返した。写真1に示すように変位計を設置し、試験体各部の変形を計測した。



(c) 断面図  
図1 試験体図

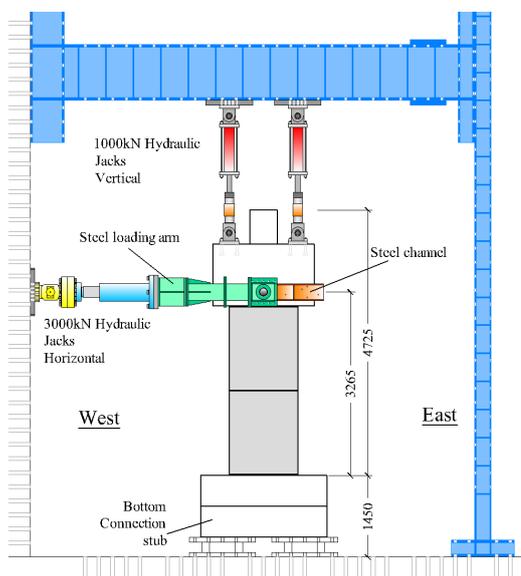


図2 載荷装置図

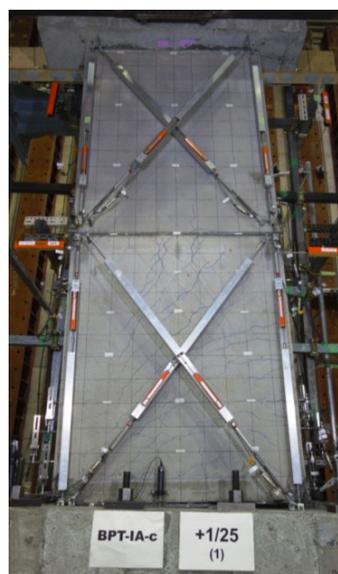


写真1 変位計設置状況

## (2) 解析モデルによる挙動予測

OpenSeesを用いた解析モデルによる実験結果の挙動予測を行った。モデルの概略図を図3に示す。壁板パネルはファイバー要素、PC鋼材およびダンパー鉄筋はトラス要素によりそれぞれモデル化した。壁脚部の長さ $h_{cr}$ の区間については、壁板のロッキング挙動を模擬するため、コンクリートが引張応力を負担しないファイバー要素を用いた。また、図4にコンクリート断面のモデル図を示す。コンクリートおよび鋼材類の材料特性には材料試験結果を用い、壁端部のコンクリートには端部拘束筋による拘束効果を考慮した。コンクリート、PC鋼材およびダンパー鉄筋には、OpenSeesライブラリ内のConcrete04モデル(Manderモデル)、Steel02モデル

(Menegotto-Pinto モデル), Steel04 モデル (修正 Menegotto-Pinto モデル) をそれぞれ適用した。なお, 目地モルタルはモデル化を省略した。

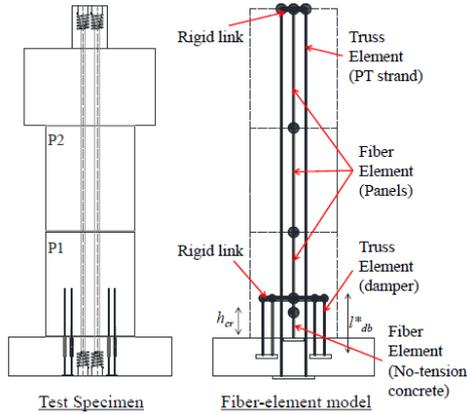


図3 モデル概略図

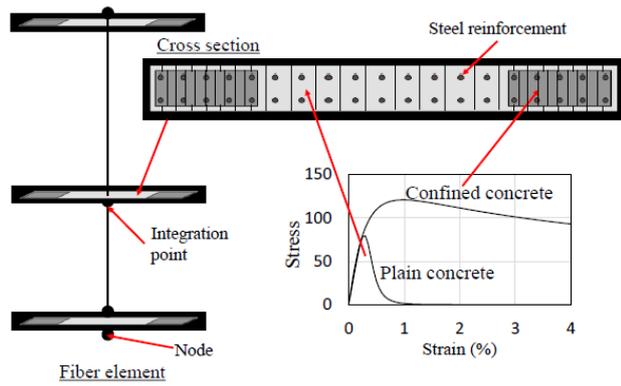


図4 コンクリート断面のモデル図

#### 4. 研究成果

##### (1) 実験による構造特性データの収集

各試験体の水平荷重—変形角関係を図5に示す。いずれの試験体も, 写真2に示すように壁脚部が大きく離間し, カバーコンクリートの剥離は発生したものの, 端部拘束域のコンクリートは比較的健全で,  $R=3\% \sim 4\%$  サイクルまでは残留変形の小さいフラッグ型の履歴性状を示した。その後, 断続的なダンパー鉄筋の破断を伴って大幅な耐力低下が確認された。また, ダンパー鉄筋の座屈により, 写真3に示すように, 周辺のカバーコンクリートが押し出されて剥落した。BPT-IA-c は他のアンボンド試験体に比べて1割程度大きな最大耐力を示したものの, 大変形時にダンパー鉄筋だけでなく一部のPC鋼材も破断し, 顕著な耐力低下とともに大きな残留変形が確認された。また, UPT-IB-c では,  $R=4\%$  サイクル負側1回目にダンパー鉄筋の座屈・破断により壁脚部の面外への移動が大きくなり, 不安定な状態となったため载荷を終了した。

ACI-ITG-5.2<sup>3)</sup>に倣い, 安定した挙動を示したアンボンド試験体2体の骨格曲線の評価を行った。壁脚離間点, ダンパー鉄筋降伏点, ダンパー鉄筋ひずみが終局ひずみの50%となる点, ダンパー鉄筋終局ひずみ点, 端部拘束域コンクリート限界ひずみ点をそれぞれ折れ点として評価した。ただし, 本実験では, ダンパー鉄筋破断により大幅な耐力低下が発生し, 端部拘束域コンクリートが限界ひずみに達していないと考えられるため, 端部拘束域コンクリート限界ひずみ点を, コアコンクリートの圧縮応力がコア圧縮強度の70%に低下した点として評価した。その結果, 図6に示す通り, ダンパー鉄筋破断による耐力低下を除けば, 比較的精度良く実験結果の包絡線を追跡することができた。

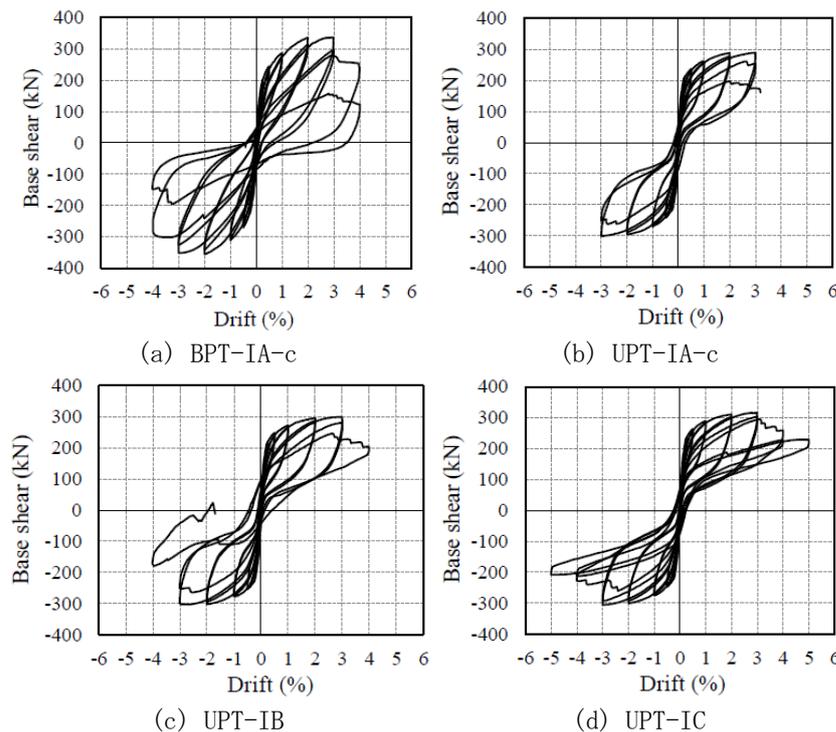


図5 水平荷重—変形角関係



写真2 脚部における離間状況 ( $R=4\%$ )



写真3 ダンパー鉄筋の破断およびコンクリートの剥落 (UPT-IC)

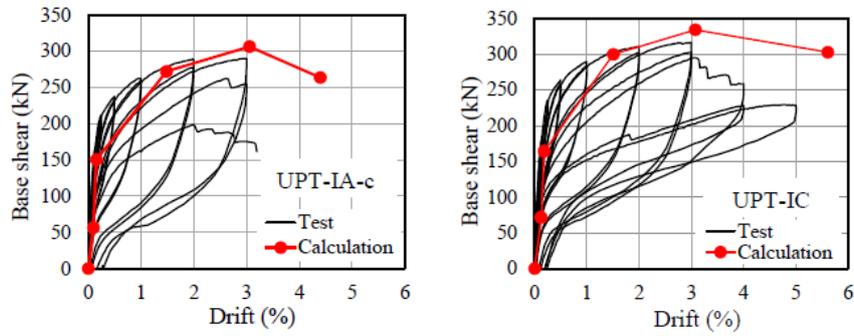


図6 骨格曲線評価

(2) 解析モデルによる挙動追跡

前述した解析モデルにより得られた、水平荷重-変形角関係、PC鋼材応力-変形角関係およびエネルギー消費係数 $\beta_h$ -変形角関係を図7、図8および図9にそれぞれ示す。図7に示す通り、本解析により剛性、最大耐力、履歴性状を精度よく追跡できた。また、ダンパー鉄筋には繰返し载荷による疲労を考慮したモデルを用いたことにより、ダンパー破断による大幅な耐力低下も適切に評価することができた。また、図8および図9より、PC鋼材応力や履歴吸収エネルギーについては、解析が実験値を若干大きめに評価する結果となったが、良好な精度で実験結果を追跡できた。

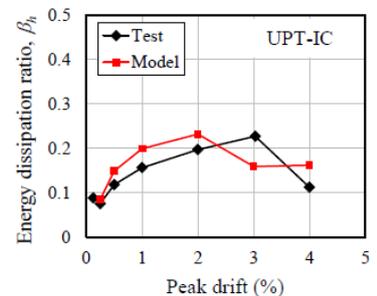
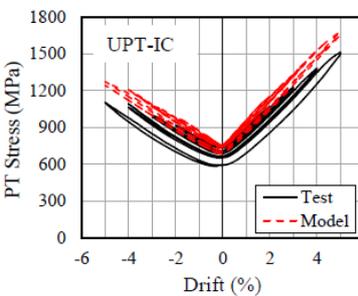
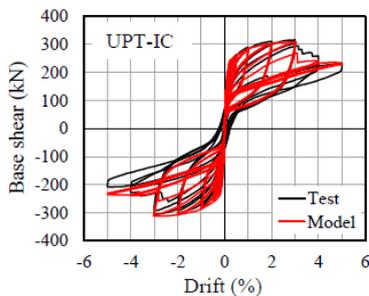
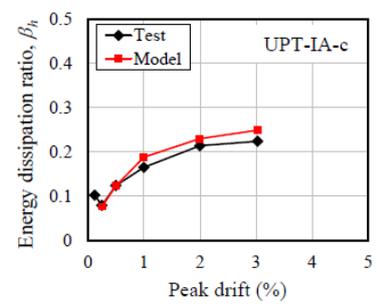
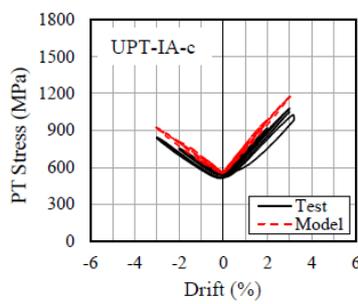
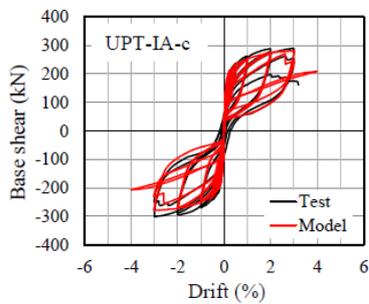


図7 水平荷重-変形角関係比較

図8 PC鋼材応力-変形角関係比較

図9 エネルギー消費係数 $\beta_h$ -変形角関係比較

<引用文献>

- 1) 国土技術政策総合研究所，建築研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第 674 号，建築研究資料第 136 号，2012. 3
- 2) 日本建築学会：2010 年チリ・マウレ沖地震被害調査報告書 2011 年ニュージーランド・クライストチャーチ地震被害調査報告書，2012. 9
- 3) ACI Innovation Task Group 5: Requirements for Design of a Special Unbonded Post-Tensioned Precast Shear Wall Satisfying ACI ITG-5.1 (ACI ITG-5.2-09) and Commentary, American concrete institute, 2009. 8

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 2 件)

- ① 劉媛, Luis Alberto Bedriñana, 谷昌典, 河野進, 西山峰広: SEISMIC PERFORMANCE OF UNBONDED POST-TENSIONED PRECAST CONCRETE WALLS WITH INTERNAL AND EXTERNAL DAMPERS PART 1: OUTLINE OF EXPERIMENT, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), C-2, pp. 787-788, 2018. 9
- ② Luis Alberto Bedriñana, 劉媛, 谷昌典, 河野進, 西山峰広: SEISMIC PERFORMANCE OF UNBONDED POST-TENSIONED PRECAST CONCRETE WALLS WITH INTERNAL AND EXTERNAL DAMPERS PART 2: TEST RESULTS, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), C-2, pp. 789-790, 2018. 9

[その他] (計 1 件)

- ① Luis Alberto Bedriñana : SEISMIC PERFORMANCE AND SEISMIC DESIGN OF DAMAGE-CONTROLLED PRESTRESSED CONCRETE BUILDING STRUCTURES, 京都大学博士学位請求論文, 2018.9

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : ルイス・アルベルト・ベドリニャナ

ローマ字氏名 : (Luis Alberto Bedriñana)

※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。