

令和元年6月7日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06476

研究課題名(和文) 収縮がRC部材のせん断耐力に及ぼす影響に関する耐久性力学的研究

研究課題名(英文) Durability mechanical study on the effect of the drying shrinkage on the shear capacity of RC members

研究代表者

伊藤 睦 (ITO, Atsushi)

中部大学・工学部・准教授

研究者番号：00345927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリートの収縮がRCはり部材のせん断耐力に及ぼす影響を探るために、2つの実験と解析的研究を行った。材齢依存型構造解析手法の妥当性を確認するために、収縮と載荷材齢を変数とした実験の数値解析を実施した結果、本解析手法は妥当な精度でせん断耐力を予測できることを確認した。収縮がせん断耐力の増減に及ぼす影響を探る実験では、試験体内部の相対湿度変化の計測を行った。収縮を初期ひずみの導入により簡便にモデル化したパラメトリック解析の結果、小型断面では、斜めひび割れ発生荷重は収縮により低下したものの、初期応力が斜めひび割れ発生位置やその角度が影響し、せん断耐力がわずかに増加する結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乾燥収縮により初期応力・損傷が導入されたRCはり部材のせん断耐力を評価した実験データは少ない。本研究では、解析手法の検証に資するために、コンクリートが硬化する過程の部材内部の相対湿度変化などのデータを取得した。解析的検討では載荷材齢の変化を評価できる解析技術を構築し、乾燥収縮がはりのせん断耐荷機構に及ぼす影響の評価を行った。今後、様々な環境作用外力を追加することにより、コンクリート構造物の各種性能の変化を解析的に評価することにつながる。

研究成果の概要(英文)：Two Experimental and analytical studies were conducted in order to investigate the effects of drying shrinkage and the age of loading on the behavior of reinforced concrete beams with and without stirrups. In an experimental study, the relative humidity inside the specimens, steel strains and crack occurrence conditions were also measured before loading test. In analytical study, the applicability of the 3-dimensional time-dependent constitutive model with Solidification concept on the prediction of the behavior of RC beams under the different loading age condition was verified. The initial stress states of RC beams were modeled by introducing initial strain in the concrete element were carried out. As the results, the loading tests and analytical results show that the diagonal cracking load of beams with initial stress due to drying decreases. The analytical result shows that initial stress effect the part and angle of diagonal cracking and increase the shear capacity.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：収縮 せん断耐力 数値解析 材齢依存型構成モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

アセットマネジメント等にあるように、既設構造物を長寿命化するために、各種環境作用ならびに地震力等の外力作用を考慮して、コンクリート構造物の将来の機能低下や構造性能変化を精度良く評価する耐久性力学的な技術の開発が求められている。収縮しやすい骨材の使用により多数のひび割れが発生した垂井高架橋に限らず、多くの PC 箱桁高架橋の橋梁点検においても斜めひび割れ等の発生が確認されており、現存する耐荷性能の評価が必要とされている。

佐藤良一や半井健一郎らは、単純はりの載荷実験により、収縮応力や収縮ひび割れがせん断強度を低下させることを確認している。また、過度な収縮ひび割れが生じない範囲では、収縮により引張鉄筋に導入されたひずみから算出される等価引張鉄筋比を、既往のせん断強度算定式(二羽式)に適用することで、斜めひび割れ発生荷重の低下を精度よく評価可能であることを示している。しかしながら、斜めひび割れを誘発するような収縮ひび割れが生じた場合にはせん断強度の低下を過小評価すること、コンクリートの特性が変わると統一的に評価できないといった課題を挙げている。このように、収縮によるせん断強度の低下は定性的には明らかなものの、定量的には評価できないのが現状である。このため、収縮によるせん断強度の低下に関する実験データの蓄積が必要であると共に、数値解析的に評価可能な技術の開発が必要と考えられる。この点について Gebreyouhannes らは、マルチスケール連成解析手法を用いて、三谷らの実験を対象とした詳細な検討結果を報告しているが、乾燥による収縮が必ずせん断強度を低下させることを結論付けることは難しく、更なる実験データが必要であるとしている。

耐久性力学問題に関する解析的研究では、前川らのマルチスケール解析に基づく解析技術が世界的にも進んでおり、この他、中村らの RBMS による物質移動と構造解析を連成させた解析技術などが挙げられるが、解析的技術の開発ならびにその高精度化はこれからの研究課題である。申請者らもこれまで、材齢依存型コンクリート構成則や付着モデルの開発を行うことで、温度解析・湿気移動解析結果を用いた初期応力解析と荷重作用による耐荷力解析とを連成して解くことが可能な各種初期応力影響下の保有耐荷力解析プラットフォームの開発を行っている。各種初期応力を有する構造物の耐荷性能を予測するためには、荷重載荷を実施する時刻までに構造物に生じた応力状態や損傷状況を妥当な精度で評価することが必要となる。そのため、材齢依存型構成則の更なる高精度化が重要となる。

2. 研究の目的

(1) 収縮により導入された初期応力や初期損傷が、せん断補強筋のない RC はり部材のせん断挙動に及ぼす影響に関する知見を得るために、封緘・乾燥養生したはりの載荷実験を行った。また実験では、数値解析技術の検証等に資するために、養生期間中のはり内部の相対湿度やはり作製に使用したコンクリートの圧縮強度や収縮ひずみの経時変化を計測することとした。

(2) 数値解析手法を用いて、はりに導入される初期応力が、荷重作用時のはりの挙動に及ぼす影響の解明を目的とした。ここでは、(1)の実験を対象とした。

(3) 断面寸法、配筋量が異なるはりに対して、はりに導入される初期応力が、荷重作用時のはりの挙動に及ぼす影響の解明を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 図1に、実験で使用した試験体の諸元を示す。せん断スパン比は約3、引張鉄筋比約1.9%であり、乾燥収縮により断面上下からひび割れが発生すること、小型の上下対称断面とすることではり内部の応力状態が一樣となることを期待して、圧縮・引張鉄筋を配置した。また、せん断スパン中央およびスパン中央の圧縮・引張鉄筋にひずみゲージを貼り付けた。コンクリートには、収縮が生じやすいように、セメントには普通ポルトランドセメント、粗骨材には砂岩を使用した。気温30℃程度で鋼製型枠にコンクリート打込み後、乾燥を防ぐために打設面を封緘して6日間実験室内で養生し、脱型後は、気温約20℃、湿度約60%の養生室で養生した。なお、試験体を6体作製し、比較対象とするために、2体の試験体は、脱型後直ちにアルミテープで封緘し、残り4体の試験体は、試験体両端断面のみアルミテープで封緘することで、乾燥露出面がはり長手方向に同一となるようにした。また、養生期間中の幾何学的境界条件は、図1に示す載荷試験時と同一とし、養生室内に試験体を設置後から試験体内部の鉄筋ひずみ、相対湿度や使用コンクリートの自由収縮ひずみの計測を開始した。載荷試験を、実験室内の気温が20℃付近の日を選んで、乾燥試験体については鉄筋ひずみがおおよそ -250μ となった材齢58日(圧縮強度 28.6N/mm^2)と材齢163日(圧縮強度 31.1N/mm^2)に、封緘試験体に

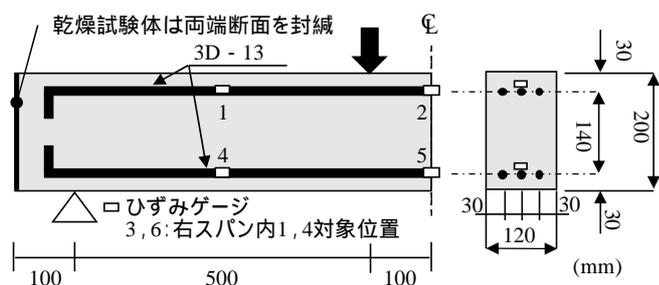


図1 試験体諸元

については材齢 72 日（圧縮強度 32.6N/mm²）にそれぞれ 2 体ずつ実施した。

(2) 図 1 の実験のはり全体を 2cm 角の 3 次元アイソパラメトリック要素でモデル化し、鉄筋を埋込み鉄筋要素でモデル化した。コンクリート構成則には、材齢依存型構成則を使用せず、硬化コンクリート用の 3 次元格子等価連続体モデルを使用した。このモデルは、要素内の力の流れに沿った局所座標系に設定した 3 本の Main Lattice とひび割れ面を介して伝達されるせん断能力と直応力を評価するために、1 ひび割れ面に対して 4 本設定される Shear Lattice を用いることにより、コンクリートの多軸挙動をそれぞれの格子に想定した応力 - 等価一軸ひずみ関係の組合せにより表現するモデルである。コンクリートの引張強度を 2N/mm² とし、引張を受けるコンクリートの軟化領域には、等価長さ l を要素体積の 3 乗根として破壊エネルギーを導入した。

本検討では、収縮によるはり部材内部の初期応力状態をコンクリート要素に部材軸方向のみ収縮の初期ひずみを導入することで模擬することとした。実験で計測された -250 μ 程度の鉄筋ひずみを勘案して、コンクリート要素に与える初期ひずみの入力値を 100, 200, 300, 350 μ と設定した。解析では、単純支持状態で所定の初期ひずみを 10 μ 増分で導入したのちに自重を作用させ、変位制御にて荷重載荷を行った。

(3) (2)と同じ解析手法を用いて、本検討では、断面寸法、配筋量を変化させた RC はり部材を対象とした。具体的には図 1 に示すように断面 120 \times 200mm、スパン 1200mm の構造諸元の RC はりを基準寸法し、寸法を 1 倍、2 倍、4 倍、8 倍と変化させた解析モデルを使用した数値シミュレーションを実施した。鉄筋比は、鉄筋比 A : 1.05%、B : 1.47%、C : 1.86% とし、収縮による初期ひずみおよび初期応力状態を模擬するために、コンクリートに部材軸方向のみ所定の膨張ひずみを与える手法を用いた。図 2 に初期ひずみ導入方法の概念図を示す。乾燥収縮による収縮の度合いは乾燥露出面からの距離により異なることから、断面寸法によらず、乾燥露出面から 500mm の位置で収縮がゼロと仮定し、乾燥露出面からの距離に応じて、2 次関数で収縮量が変化するものと仮定した。乾燥露出面での最終初期ひずみ値を 100 μ 、200 μ 、300 μ 、350 μ と変化させ、所定の初期ひずみを導入後、自重を作用させた後に荷重載荷を行った。

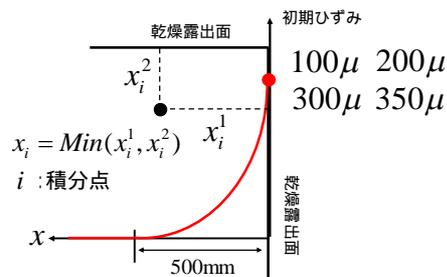


図 2 初期ひずみ導入概念図

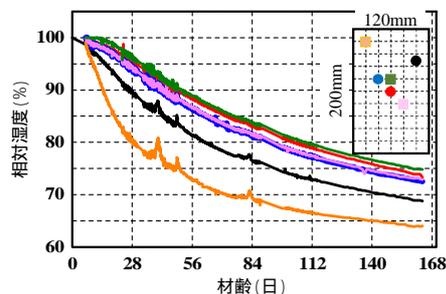


図 3 試験体内部の相対湿度変化

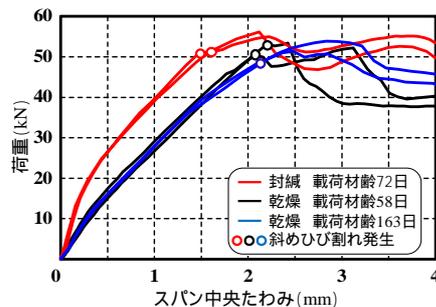


図 4 荷重 - 鉄筋ひずみ関係

4. 研究成果

(1) 載荷直前の鉄筋ひずみ、コンクリートの自由収縮ひずみの計測値を表 1 に示す。なお、表中の鉄筋ひずみ計測位置は、図 1 中に示した位置である。また、別途乾燥試験体の支点外の断面中央で計測した収縮ひずみは、材齢 58 日載荷試験直前で -362 μ であった。圧縮強度は材齢 28 日でほぼ発現し、その後の増加はわずかであった。封緘養生したテストピースの材齢 72 日の圧縮強度は乾燥養生に比して 1 割ほど高い結果が得られた。乾燥試験体の鉄筋ひずみは、材齢 84 日まで圧縮側に増加し、それ以降はわずかに減少する傾向となった。材齢 84 日でコンクリートの収縮ひずみ増分がほぼ頭打ちとなったことや、試験体表面の軽微なひび割れが内部へ進展したことにより、鉄筋周辺のコンクリート剛性が低下したためと

表 1 試験結果

養生方法 載荷材齢	試験体 No	載荷直前のひずみ値						収縮 ひずみ (μ)	斜めひび割れ 発生荷重 P(kN)	$V_c/f_c^{1/3}$	耐力 (kN)
		1	2	3	4	5	6				
封緘 72日	1	-30.5	-34.3	-35.2	-	-29.5	-28.5	-821.1 (乾燥養生)	50.9	7.97	55.1
	2	-37.1	-38.1	-39.0	-19.0	-38.1	-19.0		51.6	8.08	56.1
乾燥 58日	1	-	-247.6	-	-247.6	-212.4	-148.6	-728.0	53.2	8.67	53.4
	2	-	-246.6	-252.4	-239.0	-134.0	-84.8		50.4	8.21	52.2
乾燥 163日	1	-246.7	-260.0	-223.8	-	-	-150.5	-914.4	48.2	7.66	51.3
	2	-243.8	-284.8	-256.0	-203.8	-	-201.9		48.1	7.64	53.8

備考 - : 断線他で計測不可 Vc : 斜めひび割れ発生荷重/2

考えられる。

図3にははり試験体支点外の断面において図中に示す位置での相対湿度の材齢変化を示す。図中の断面内の○印と 印は別試験体での計測値を意味する。計測は、コンクリート打込み時にφ10mmの丸鋼を端断面から深さ5cm差込むことで設けた穴に、脱型後、温湿度センサーを設置して粘土とアルミテープで封緘することで行った。本実験で採用した小型断面であっても材齢163日では、はり試験体内部の相対湿度は周囲相対湿度60%に到達しておらず、およそ65%から75%の範囲の値となった。

図4に载荷試験により得られた荷重-変位関係を示す。なお、図には目視で確認された斜めひび割れ発生荷重を○印で示し、表1にその値を示す。図5に、载荷試験前後のひび割れ性状の一例を示す。図では、载荷試験前に観察されたひび割れを黒線で、荷重載荷時のひび割れを赤線で示している。なお、载荷前に観察されたひび割れは全て軽微なものであり、アセトンを塗布することで確認できる程度のひび割れであった。図4より、収縮により導入された軽微なひび割れや初期ひずみ、初期応力により、初期剛性は低下し、材齢163日の斜めひび割れ発生荷重は、封緘試験体に比べてわずかに低下する結果が得られたが、せん断耐力に及ぼす影響は確認されなかった。载荷材齢により、コンクリートの圧縮強度が異なることから、既往のせん断強度評価式を用いて、斜めひび割れ発生時のせん断力を圧縮強度の1/3乗で除した値を表1に示すが、材齢163日载荷時は、封緘試験体と比較して5%ほど低下しているが、58日载荷の試験体では、わずかに高い値となっている。図5のひび割れ性状では、乾燥試験体に生じる引張鉄筋付近での斜めひび割れ位置(○印位置)は、封緘試験体のそれと比べてわずかに支点側に移る傾向が得られた。

(2) 図6の各所定の初期ひずみ導入後に载荷した際の荷重-変位関係の比較から、初期応力の影響により曲げひび割れ発生荷重の低下が確認できる。曲げひび割れ発生後の剛性に初期応力が及ぼす影響はないが、斜めひび割れ発生荷重は、初期ひずみゼロ時の斜めひび割れ発生荷重と比較して最大で9%程度ほど低下した。なお、解析における斜めひび割れ発生荷重の評価は、荷重-変位関係において曲げひび割れ発生後の剛性が変化する点とした。図7に、実験と解析で得られた斜めひび割れ発生荷重と耐力を、実験と解析それぞれで得られた封緘試験体や初期ひずみゼロ時の斜めひび割れ発生荷重で除した荷重割合と载荷直前の鉄筋ひずみの最大値の関係を示す。実験の荷重値は、载荷時の圧縮強度の違いによる影響を排除するために、各材齢時の圧縮強度の1/3乗で除している。図より、実験の斜めひび割れ発生荷重は、载荷材齢58日と163日で载荷直前の鉄筋ひずみはほぼ同等であるのに対して、58日では1.0を上回り、163日では下回る結果となった。この理由は定かではないが、収縮によりひび割れが発生した部位や、载荷時の気温の影響も考えられる。また図8より初期応力の増加に伴い、曲げひび割れ本数の増加、曲げひび割れがより圧縮縁方向に進展すること、斜めひび割れがより支点側に移ることなどが確認でき、これらがはりの耐荷機構においてアーチ機構の割合を高めたことにより、耐力が増加したと考えられる。

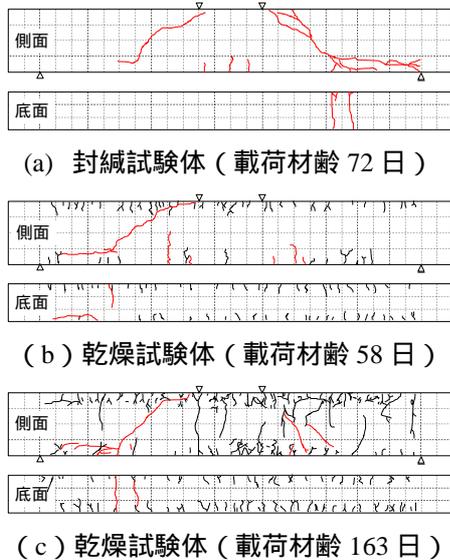


図5 荷重載荷前後のひび割れ発生状況

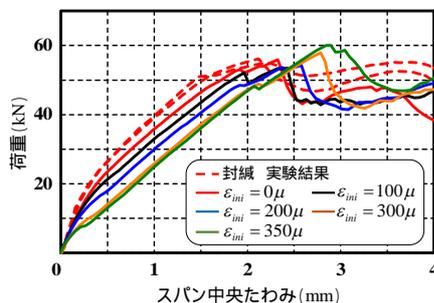


図6 解析による荷重-変位関係

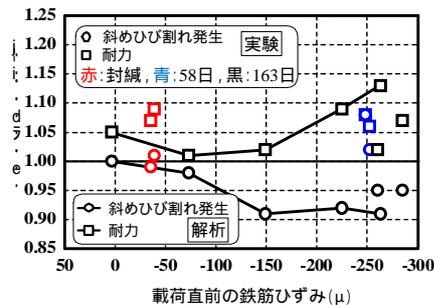


図7 収縮が斜めひび割れ発生荷重、耐力に及ぼす影響

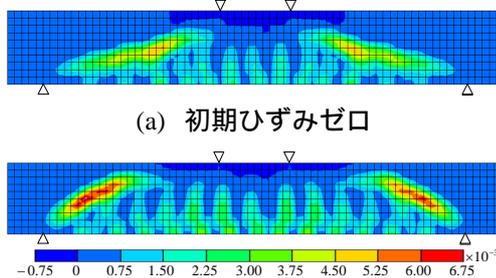


図8 最大荷重時のひび割れ性状

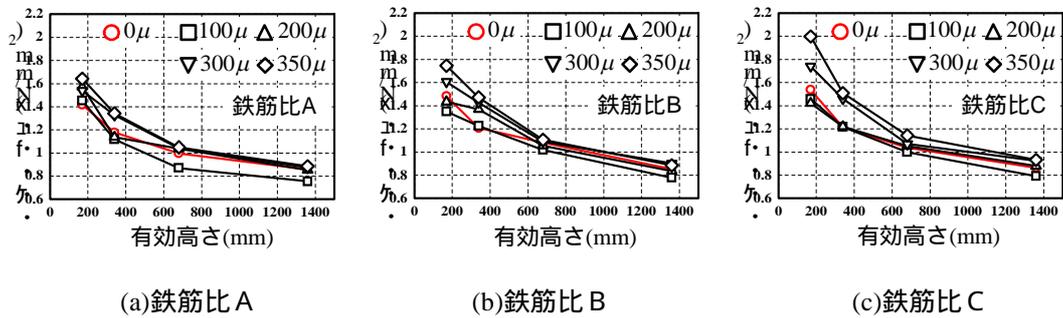


図9 せん断強度 - 有効高さ関係

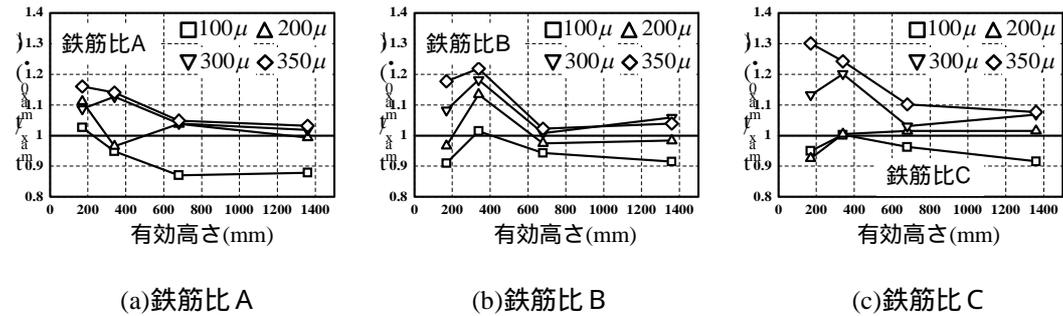


図10 せん断強度増減率 - 有効高さ関係

(3) 図9に鉄筋比ごとのせん断強度 - 有効高さ関係を示す。この結果、本検討で導入した初期ひずみの範囲では、断面寸法が小さい場合には、せん断強度は初期損傷の無い初期ひずみ 0μ 時のせん断強度と比較してわずかに高くなる傾向があるが、断面寸法が大きくなると、せん断強度はほぼ同等か小さくなる結果が得られた。図10は、解析で得られたせん断強度を無損傷時のせん断強度で除することで得られたせん断強度増減率 - 有効高さ関係である。本検討範囲内では、導入初期ひずみが小さい場合の方が、せん断強度が低下する結果が得られた。これは、ひび割れが発生しない程度の初期ひずみの導入は、見かけの引張強度を低下させることとなるためと考えられる。一方でひび割れが発生する程度の初期ひずみを導入した場合にせん断強度がわずかに増加した理由は、(2)の検討結果と同様に、斜めひび割れの発生位置や発生角度が変化したためである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- (1) 栗永季幸・伊藤 睦：収縮がRCはり部材のせん断耐荷挙動に及ぼす影響に関する研究，第27回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，Vol.1，pp.447-452，2018，査読有
- (2) ロプレス翔・伊藤 睦：時間依存型構造解析手法によるRCはり部材の数値解析，第25回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，Vol.1，pp.583-588，2016，査読有

〔学会発表〕(計 6 件)

- (1) Atsushi ITOH: Ultimate load capacity analysis for RC beams with initial stress, JCI-TCI Workshop on Initial Crack Control in Concrete and Its Functional Role in Extending the Service Life of Concrete Structures 2018
- (2) 栗永季幸・伊藤 睦：収縮がRCはり部材のせん断耐荷挙動に及ぼす影響に関する研究，第27回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，2018
- (3) 橋本敬宏・伊藤 睦：収縮がRCはり部材のせん断挙動に及ぼす影響に関する解析的研究，土木学会中部支部研究発表会，2018
- (4) 永井大吾・伊藤 睦：乾燥収縮がRCはり部材のせん断耐力に及ぼす影響に関する実験的研究，土木学会中部支部研究発表会，2018
- (5) 瀧直寛・伊藤 睦：日射が擁壁コーナー部のひび割れ発生に及ぼす影響に関する一考察，平成28年度土木学会中部支部研究発表会，2017
- (6) ロプレス翔：時間依存性構造解析手法によるRCはり部材の数値解析，第25回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，2016

6. 研究組織

- (1) 研究分担者
なし

(2)研究協力者
なし

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。