

平成 22 年 6 月 25 日現在

研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19560490  
 研究課題名(和文) 振動台実験と数値実験による墓石の最適な耐震補強工法の策定に関する研究  
 研究課題名(英文) Research on suitable seismic retrofitting method for tombstones based on shaking table test and numerical simulation  
 研究代表者  
 三輪 滋 (MIWA SHIGERU)  
 飛鳥建設株式会社・技術研究所・所長  
 研究者番号：60443636

## 研究成果の概要(和文)：

墓石の耐震性向上を図るため、採用実績の多い墓石の耐震補強工法に着目し、実験的、解析的研究を通して、その力学特性、経年劣化特性を把握するとともに、最適な寸法や配置の検討を行い、効果的な補強のための基礎的なデータを得た。

## 研究成果の概要(英文)：

To improve the effect of the retrofitting method on tombstones, basic data for the effective retrofitting, which were the mechanical characteristics, the degradation characteristics by time passing, suitable sizes and arrangements and so on, were obtained by experiments and numerical simulations.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：墓石、耐震補強、3次元振動台実験、3次元個別要素法、連結工法、心棒、最適配置、接着工法

## 1. 研究開始当初の背景

我が国の墓石は、単に石を積んでいるだけの簡単な構造のものが多く、特別に補強を施しているもので無い限り、地震が起こると転倒しやすい。1995年の兵庫県南部地震では、非常に数多くの墓石が転倒・破損した。しかし、それに関わらず、未だに多くの既存墓石が地震に対して無対策のままに放置されている。2005年の福岡県西方沖地震では、お

墓参りの最中に地震が発生し、転倒してきた墓石の下敷きになって怪我をした人もいた。

このように、地震による墓石の転倒は、単に墓石の破損・損壊という物的被害に収まらず、人的被害にもつながる非常に深刻な問題である。しかし、現状では、墓石の耐震設計という概念は存在していない。しかも最近では、墓地が緊急避難場所に指定されている場合もあるため、二次災害を防止する意味でも、

墓石の耐震性の検討は重要課題であり、地震に強い墓石の構造及び補強方法についての検討は、非常に重要で意義深いことであると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、採用実績の多い墓石の耐震補強工法に着目し、実験的、解析的研究を通して、その力学特性、経年劣化特性を把握するとともに、最適な寸法や配置の検討を行い、その効果を定量的に評価することを目的としている。

## 3. 研究の方法

以下の方法を用いて研究を実施した。

- (1) 地震による墓石被害調査
- (2) 実物大模型による振動台実験による墓石の地震時挙動の把握
- (3) 個別要素法解析手法の開発とそれを用いた数値実験による墓石に地震時挙動の把握
- (4) 耐候性促進試験と引張試験、せん断試験による接着工法の接着剤の強度特性、経年劣化特性の解明
- (5) 振動台実験、数値実験による心棒、接着剤による墓石の耐震補強効果の検討
- (6) 振動台実験、数値実験による石材店の墓石の簡易な地震対策の検討
- (7) 振動台実験、数値実験による墓石の転倒基準の検討と提案
- (8) 数値実験による大規模墓地の地震時被害シミュレーション

## 4. 研究成果

### (1) 地震による墓石の被害調査

研究期間中に発生した 2007 年新潟県中越沖地震、2009 年の駿河湾の地震による墓石の被害調査を実施し、最近の墓石被害の特徴を調べた。

2007 年新潟県中越沖地震の震源近傍で墓石の転倒調査を実施し以下の結論を得た。

- ① 柏崎市内における対策を施していない墓石の転倒率は、ほぼ 100%であり、柏崎市内では非常に大きな地震動が作用したことが推定される。
- ② 近年、特に兵庫県南部地震以降、墓石の耐震対策が図られるようになり、それ以降の墓石の転倒率は非常に小さい。
- ③ それ以前の墓石の転倒率は、かなり大きい。また柏崎市内の石材店の無対策墓石の転倒率は 84%~100%であった。
- ④ 新潟県中越地震で被害を受けた地域の墓石は、補強が施され、古いものでも転倒していないものも見られた。
- ⑤ 柏崎周辺では、墓石の耐震補強は接着剤によるものが多い。
- ⑥ 今後の墓石転倒率調査では、墓石の建立年

代や耐震補強の有無を区別して行う必要がある。

2009 年の駿河湾の地震では、細い尾根筋の不安定な斜面の墓石、液状化した地盤上の墓石など特定の地域での墓石被害が特徴的であった。

### (2) 心棒による補強の検討

心棒により連結補強された墓石の耐震性を評価するために、実寸大の墓石試験体を作成し、振動台実験を行った。心棒の直径、長さおよび本数の異なる 3 通りのモデルの地震時挙動を、無補強墓石の実験結果と比較することで、心棒の寸法と本数が耐震性に与える影響について検討を行った。

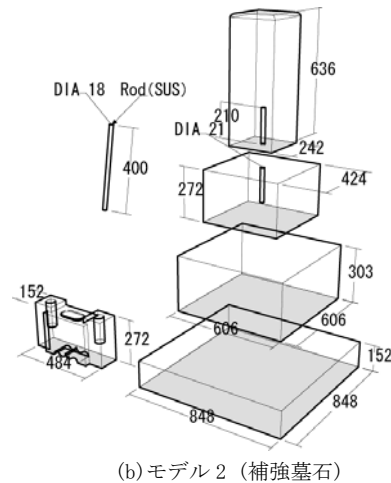
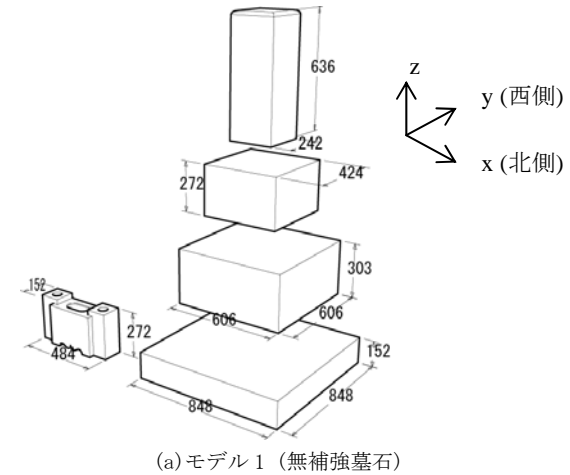


図1 墓石試験体の概要(単位 mm)

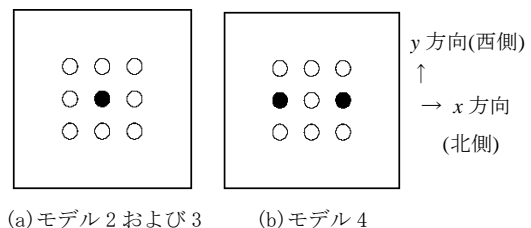


図2 棹石下面に開けられた心棒設置用の穴 (●が心棒の設置位置)

表1 墓石モデルの分類と各石の寸法・質量  
(長さの単位: mm)

モデル名	心棒本数	心棒の寸法	棹石	上台	中台	芝台	水鉢
1	なし	—	W242 ×	W424 ×	W606 ×	W848 ×	W484 ×
2	1本	d18 L400	D242 ×	D424 ×	D606 ×	D848 ×	D152 ×
3	1本	d10 L150	H636	H273	H303	H152	H272
4	2本	d10 L150	質量 108kg	質量 142kg	質量 322kg	質量 315kg	質量 46kg

(d:直径, L:長さ, W:幅, D:奥行き, H:高さ)

無補強では転倒に至る震度6強の地震動でも、心棒で補強することにより転倒しないことがわかった。しかし、さらに強い震度7では、棹石と上台が一体となって転倒することがわかった。転倒の有無についてのみ比較すれば、心棒の寸法と本数に関係なく、同じ結果となったが、加振中の挙動は、心棒の寸法と本数により異なったものであった。細く短い心棒が1本だけ挿入された場合は、連結が不完全であり、棹石は上台に対して相対運動を起こし、心棒周りの回転運動も起こすことがわかった。心棒を2本に増やすことで、心棒周りの回転運動を抑えることはできたが、棹石の相対運動は防げなかった。一方、太く長い心棒を用いた場合は、1本であっても、棹石と上台の連結効果が発揮され、棹石は相対運動も回転運動も起こすことなく、棹石と上台が一体となって転倒した。振動台実験によって、同じ心棒1本による補強でも、心棒の直径と長さの違いによって、振動メカニズムが異なることが明らかとなった。連結効果を得るには、適切な心棒の寸法の決定が必要であることがわかった。

適切な心棒の寸法を決定するために、3次元個別要素法 (DEM) を用いて検討した。検討に際して、まず、解析結果の信頼性を確認する必要があるため、振動台実験を実施した4モデルの挙動の再現を試みた。その結果、解析によって高い精度で推定が可能であることを確認した。一部、棹石が心棒から抜け落ちるといった実験では確認できなかった転倒モードが解析で得られたが、これは過去の地震調査で明らかにされている現象であり、起こりうる妥当なモードであると判断した。解析結果の信頼性を確認した後、振動台実験では実施できなかった、直径が太く短い心棒、直径が細く長い心棒により補強された墓石の地震時挙動の再現を試みた。その結果、直径が18mmと太ければ、150mmと短い心棒で連結効果が発揮されること、直径が10mmと細ければ、250mm以上の長い心棒が必要である

ことがわかった。心棒が長いと設置時に多くの労力を要するが、直径を太くすることで、労力の少ない短い心棒を採用できることがわかった。さらに、上台と中台の間に直径18mmで長さ150mmの心棒を設置すれば、震度7でも転倒に至らないことも検証できた。

表2 試験体の転倒状況

モデル名	心棒本数	心棒の寸法	震度6弱	震度6強	震度7
1	なし	—	△	×	×
2	1本	d18 L400	△	△	※
3	1本	d10 L150	△	▽	※
4	2本	d10 L150	△	▽	※

△:変位・ずれが生じる

▽:変位・ずれが生じ、水鉢のみ転倒

×:棹石・水鉢が転倒 ※:棹石・上台・水鉢が転倒

表3 心棒の直径と長さの異なる墓石の数値解析結果(括弧内は実験結果)

	直径18mm	結果	直径10mm	結果
長さ150mm	モデル2a	一体	モデル3 (一体)	棹石
長さ200mm	モデル2b	一体	モデル3b	棹石
長さ250mm	モデル2c	一体	モデル3c	一体
長さ400mm	モデル2 (一体)	一体	モデル3d	一体

一体: 棹石と上台が一体となって転倒

棹石: 心棒から抜け落ちて棹石のみ転倒

### (3) 接着剤による補強の検討

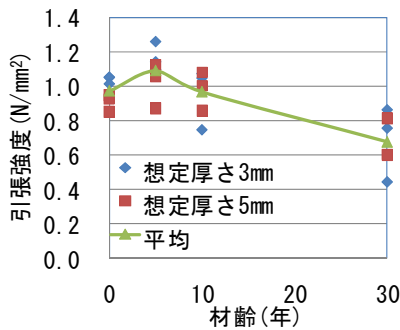
墓石の耐震補強における、接着剤の経年変化による強度低下の影響を検討するため、促進試験で長期の材齢試験体を作成し、引張試験、せん断試験で強度の経年変化を調べ、さらに、個別要素法に基づく数値解析により、接着剤の経年変化による墓石の地震時挙動の違いを比較・検討した。

まず、多く墓石に使用されている変性シリコン接着剤で接着した2枚の石材片の耐候性促進試験を実施し、材齢0年、1年、5年、10年、20年、30年に相当する試験体を作成した。次に、材齢0年、5年、10年、30年の試験体に対して一軸引張試験を、材齢0年、1年、20年の試験体に対して繰返しせん断試験を実施し、経年劣化によって強度特性がどのように変化するかを調べた。引張強度特性については、引張強度、破断時ひずみ、等価ヤング率が材齢とともにどのように変化するかを整理した。せん断強度特性についても、繰返しせん断応力と繰返し回数との関係とせん断強度が材齢とともにどのよう

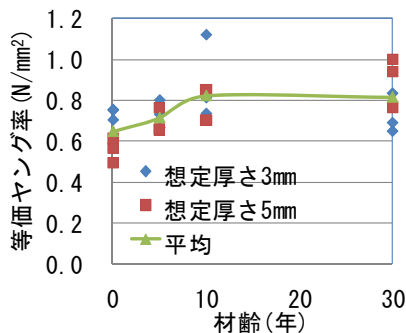
に変化するのかを調べた。さらに、個別要素法に基づく数値解析によって、材齢 0 年、5 年、10 年、30 年、50 年の接着剤で補強された墓石の地震時応答解析を実施した。その結果、以下のことがわかった。

①接着剤は経年変化により、接着の効果が変化する。接着直後よりも、5 年程度経過したほうが、接着剤の硬化により引張強度が増加する。その後は、時間とともに徐々に強度が減少し、30 年で初期強度の 60%程度の強度となる。繰返しせん断強度は、材齢 20 年程度まで大きな変化が見られなかった。

②石材間の接着面の中央 1 点に径 100mm の接着剤を塗布した場合と 4 隅に 1 か所ずつ径 50mm の接着剤を塗布した場合は、材齢に関係なく棹石が転倒してしまうため、転倒を防止するには補強の必要があることがわかった。



(a) 材齢と引張強度の関係

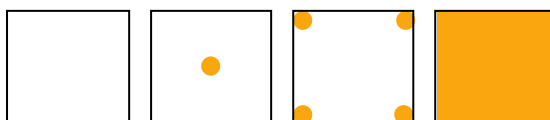


(b) 材齢と等価ヤング率の関係

図 3 材齢と引張強度特性の関係

表 4 墓石の石材間の接着のケース

ケース名	接着剤	接着材の塗布面
無接着	なし	—
1点接着(径100mm)	あり	径100 mmを中央に1箇所
4点接着(径50mm)		径50mmを4隅に1箇所ずつ
4点接着(径100mm)		径100 mmを4隅に1箇所ずつ
全面接着		全面に接着



(a) 無接着 (b) 1点接着 (c) 4点接着 (d) 全面接着

図 4 墓石の石材間の接着のケース

③4 隅に 1 か所ずつ径 100mm の接着剤を塗布した場合は、材齢 30 年までは棹石が転倒しないが材齢 50 年では棹石が転倒してしまうこと、石材間全面に接着剤を塗布した場合は材齢 50 年でも棹石が転倒しないことがわかった。

④墓石は、接着剤により、適切な補強を行うことで、数十年という長期にわたって耐震性を確保できることがわかった。

今後の課題として、長期材齢の試験体が十分でなく、材齢 20 年での引張強度特性、材齢 30 年せん断強度特性などのデータが不足しておりこれらの追加検討が必要である。また、接着剤の実際の施工厚さはもっと薄い場合が多いとのことでさらに薄い厚さのケースを増やして接着剤厚さと引張・せん断強度特性の関係を調べる必要がある。また、接着面積の小さい場合の数値解析も必要である。

表 5 棹石の転倒状況

		材齢				
		0年	5年	10年	30年	50年
接着状況	無接着	××				
	1点接着(径100mm)	×	×	×	×	×
	4点接着(径50mm)	×	×	×	×	×
	4点接着(径100mm)	○	○	○	○	×
	全面接着	○	○	○	○	○

○: 変化なし ×: 棹石が転倒

××: 棹石と上石が転倒

#### (4) 石材展示場の墓石の地震対策

施工が容易で取り外しの可能な心棒による補強工法を用いることを想定し、石材店展示場の墓石の簡易な地震対策について検討を行った。まず、実物大の墓石試験体の振動台実験を行った。心棒の本数の異なる 4 通りのモデルの地震時挙動を、無補強墓石の実験結果と比較することで、心棒の効果と本数の違いが耐震性に及ぼす影響について検討を行った。振動台実験の結果、無補強では転倒に至る震度 6 強の地震動でも、心棒で補強することにより転倒しないことがわかった。心棒の本数によって、棹石の回転や、棹石と上台の一体化の程度に差が見られた。転倒を防止できるかどうかに着目すれば、心棒 1 本と心棒 1 本以上とでは、大きな差は見られなかったので、心棒は 1 本でよいと判断した。

次に、3 次元個別要素法を適用して、墓石展示場の地震時挙動シミュレーションを実施した。無対策のケース、心棒で連結したケースの比較を行い、心棒による連結対策の効果について検討を行った。その結果、計測震度 6.3 の地震動に対しては、棹石の幅高さ比

に応じた適切な寸法の心棒を用いることで、転倒を防止できることがわかった。しかし、計測震度 6.4 の地震動に対しては、幅高さ比が 2.75 までの棹石しか心棒によって転倒を阻止できなかった。以上のことより、大地震に備えるためには、幅高さ比が 2.75 以下の棹石を心棒で補強した上で展示することとし、それより幅高さ比の大きな墓石は展示せず、横に倒して置くのがよいと判断した。

表 6 地震対策の検討ケース

ケース	対策	棹石と上台に開けられた穴
1	無対策	なし
2	直径 10mm, 長さ 150mm の心棒 1 本	直径 12mm 高さ 80mm
3	直径 10mm, 長さ 150mm の心棒 1 本	直径 21mm 高さ 210mm

表 7 転倒現象のまとめ

(a) 新潟県中越沖地震 (K-net 柏崎) / 計測震度 6.3

ケース名	幅高さ比									
	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50
1	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

(○:転倒しない, ×:転倒する)

(b) 兵庫県南部地震 (神戸海洋気象台) / 計測震度 6.4

ケース名	幅高さ比									
	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50
1	○	○	×	×	○	×	×	×	×	×
2	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×
3	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×

(○:転倒しない, ×:転倒する)

#### (5) 墓石の転倒基準の提案

3次元個別要素解析によって地震時の墓石の転倒基準を作成した。

まず、様々な正弦波を入力した解析によって、各最大加速度に対して転倒する墓石の高さ幅比の最小値を振動数毎に求め、転倒基準とした。得られた成果を以下に示す。

①墓石は入力地震動の振動数が高くなるほど転倒しにくくなる。

②1.5Hz 以下の低振動数では、振動数の影響を受けず、最大加速度のみによって評価される。

③1.5Hz 以下の低振動数領域では、静的転倒加速度の式を用いて墓石の転倒を評価できる。

④無補強墓石の転倒基準式は次式で表される。

$$H/B = \frac{a(f)}{PGA} = \frac{826.8\sqrt{1+(f/1.92)^{4.6}}}{PGA}$$

⑤正弦波による転倒基準を実地震動に適用するには、等価振動数=最大加速度/(2×最大速度)の式を用いて振動数を決定すればよいことを提案した。

⑥心棒によって補強することで転倒しにくくなる。補強墓石の転倒基準式は、次式で表される。

$$H/B = \frac{a(f)}{PGA} = \frac{1162.9\sqrt{1+(f/1.84)^{4.5}}}{PGA}$$

⑦提案した転倒基準によって、実寸大墓石を用いた3次元振動台実験結果をよい精度で推定できた。

#### (6) 広域避難場所に指定された大規模墓地の地震時転倒被害シミュレーション

災害時の広域避難場所に指定されている青山墓地全域を対象に、首都直下地震時の墓石転倒率の被害推定を行った。首都直下地震として、1923年関東地震と東京湾北部地震を想定した。まず、断層モデルから青山墓地の工学的基盤面地震動を推定した。次に、青山墓地内の3地点を選び、1次元表層地盤モデルを作成した。工学的基盤面地震動を表層地盤モデルに入力し、一次元重複波理論により地表面地震動を推定した。東京湾北部地震の方が最大加速度分布は大きな値を示した。さらに、青山墓地に実在する1区画21墓石を対象に墓石を積み重ねただけの無補強墓石と仮定した場合と、心棒で石材間を連結した補強墓石と仮定した場合の転倒被害シミュレーションを実施した。無補強時には関東地震で13体、東京湾北部地震で20体が転倒することがわかり、大きな被害を被ることがわかった。補強墓石は1体も転倒せず、心棒による補強は有効であることがわかった。本検討では、心棒をモデル化せず竿と上台を一体とモデル化したが、竿と上台の連結効果は石に開けた穴の寸法と心棒の寸法に依存すると考えられる。心棒のモデル化については今後の課題としたい。あわせて、墓石の転倒距離から墓石のからだの程度の範囲で転倒による被害の可能性があるか検討した。その結果、竿の上面の中心点から竿の2倍程度、墓石の高さの1倍程度の長さの区間では、墓石の転倒により危険が生じる可能性があることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ①古川愛子、清野純史、三輪 滋、振動台上の墓石の地震時挙動再現に関する個別要素法の適用性、第6回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム論文集、査読有、2007.6、pp.791-798
- ②古川愛子、清野純史、三輪 滋、連結・免震による墓石の耐震性向上効果の実験的検証、土木学会地震工学論文集、査読有、Vol.29、A06-050、2007.8、pp.412-419
- ③古川愛子、三輪 滋、清野純史、実寸大模型を用いた振動台実験および数値実験に基づく心棒の寸法および本数が墓石の耐震性に及ぼす影響の検討、土木学会応用力学論文集、査読有、Vol.11、2008.8、pp.603-613
- ④Shigeru Miwa, Aiko Furukawa and Junji Kiyono, Shaking Table Test on Seismic Behavior of Tombstone with and without Reinforcement, 14th World Conference on Earthquake Engineering Conference Proceedings, 査読有、No.12-01-0266, 2008.10.
- ⑤古川愛子、三輪滋、清野純史、石材店展示場の墓石の簡易な地震対策について、地域安全学会論文集、査読有、No.10、2008.11、pp.271-279
- ⑥古川愛子、三輪滋、清野純史：心棒の寸法・本数が洋型墓石の地震時挙動に及ぼす影響の分析、土木学会構造工学論文集、査読有、Vol.55A、2009.3、pp.372-382
- ⑦古川愛子、三輪滋、清野純史、大塚久哲、基礎形式と接着剤の塗布条件が墓石の地震時挙動に及ぼす影響の解析的検討、土木学会応用力学論文集、査読有、Vol.12、2009.8、pp.469-480
- ⑧古川愛子、大塚久哲、三輪滋、小野達也、墓石の地震時転倒基準の提案および適用性の検証、土木学会地震工学論文集、査読有、第30巻、2009.11、pp.544-553
- ⑨小野達也、古川愛子、三輪滋、大塚久哲、1923年関東地震および東京湾北部地震を想定した青山墓地の転倒被害シミュレーション、査読有、土木構造・材料論文集第25号、2009.12、pp.102-110

[学会発表] (計 5 件)

- ①三輪滋、本山寛、2007年新潟県中越沖地震における墓石転倒調査、日本地震工学会、2007年11月14日、東京大学
- ②三輪滋、古川愛子、清野純史、心棒の寸法・本数が墓石の耐震性に及ぼす影響の実験的検討、土木学会、2008年9月12日、東北大学

- ③清野純史、古川愛子、三輪滋、心棒の寸法・本数が墓石の耐震性に及ぼす影響の解析的検討、土木学会、2008年9月12日、東北大学

- ④三輪滋、心棒の寸法・本数が墓石の耐震性に及ぼす影響の実寸実大模型を用いた振動台実験による検討、日本建築学会、2008年9月20日、広島大学

- ⑤三輪滋、古川愛子、清野純史、心棒の寸法・本数が洋型墓石の耐震性に及ぼす影響の振動台実験による検討、日本地震工学会、2008年11月4日、仙台市情報・産業プラザ

[その他]

ホームページ

2009年8月11日の駿河湾の地震による墓石の被害調査

<http://www.tobi-tech.com/lab/Bousai/20091002/surugawanjishin.htm>

新聞

読売新聞 2009年12月3日夕刊掲載

墓石の耐震化について

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三輪 滋 (MIWA SHIGERU)

飛島建設株式会社・技術研究所・所長

研究者番号：60443636

### (2) 研究分担者

清野 純史 (KIYONO JUNJI)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：00161597

古川 愛子 (FURUKAWA AIKO)

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：00380585

### (3) 連携研究者：なし