

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360227

研究課題名（和文）

実建築物への適用性を重視したMEMS活用型の耐久性診断技術の確立に関する研究

研究課題名（英文）A study on the establishment of durable diagnostic technology in the use of MEMS with an emphasis on applicability to a real building

研究代表者 大久保 孝昭（OHKUBO TAKAAKI）

広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60185220

研究成果の概要（和文）：

本研究は、建築物や部材の劣化や健全度を判断するために、実際の建築物において、計測の制約にとらわれない技術として、本研究により、下記を明らかにした。

- (1) 本研究で開発した無線加速度 MEMS センサにより、構造物の振動性状、地震や交通振動を精度よく計測でき、構造物の長寿命化のための診断システムの基盤を構築した。
- (2) IC タグを用いた構造物の維持管理の高度化のための情報保管・入手システムの実用化の基盤を構築し、一部実用化を達成できた。
- (3) 無線および NFC 技術を活用した濡れセンサの試作を行い、実用化のための基礎実験を行い、その見通しを得た。

以上の成果は構造物の長寿命化のための診断技術として極めて有効であると考えている。

研究成果の概要（英文）：

In order to determine the degree of deterioration of the members and buildings, in real buildings, as a technology-agnostic constraints of measurement, this study revealed the following.

- (1) The wireless acceleration MEMS sensor developed in this study, it is possible to accurately measure the vibration characteristics of the structure, the traffic vibration and earthquake, was laid the foundation of the diagnostic system for long service life of the structure.
- (2) To build a basis for the practical application of information storage and available system for sophisticated maintenance of the structure using the IC tags, it was possible to achieve some practical use.
- (3) We manufactured a wetting sensor utilizing the NFC technology and wireless, is carried out basic experiments for practical application, to obtain the prospect.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2011年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2012年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	13,300,000	3,990,000	17,290,000

研究分野：建築材料学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：維持管理，耐久性，無線センサ，MEMS，加速度，濡れ，IC タグ

1. 研究開始当初の背景

建築物の長寿命化に寄与する合理的な維持管理を実施するためには、建築物および建築部材の性能・品質を定期的に点検することが重要である。そのためには、建築物にセンサを設置したり、点検時に装置を持ち込んで計測や検査をすることが必須である。この点検に関する現段階の最大の問題は、センサと計測装置との間の配線を代表とする計測業務の煩雑さである。建築物の規模が大きくなるほどこの問題は顕在化し、建築物を使用しながら計測することが非常に困難となる。したがって、構造物の長寿命化を達成するためには、実構造物への適用が容易な検査・診断技術の開発が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究は、建築物や部材の劣化や健全度を判断するために、実際の建築物において、計測の制約にとらわれず何をどの部位で計測し、どのような物性値で評価するかを明確にし、この評価を実現するために MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて建築物、建築部材の健全度 (劣化度) を簡便に計測・モニタリングする「耐久性診断・評価システム」の基盤を開発することを目的として実施した。

3. 研究の方法

本研究では実構造物に関し下記の適用実験を実施した。

- 1) 常時微動計測による構造物の振動性状
- 2) 実構造物の耐震補強効果の確認
- 3) 地震発生時の振動性状
- 4) 大空間構造における天井の劣化性状
- 5) サイディング外壁の劣化性状
- 6) RC 外壁の補修効果の確認
- 7) 交通振動計測に基づく橋梁の劣化度判定
- 8) 維持保全のための IC タグによるコンクリート情報保管

また、実構造物に新技術を実用化するために、実験室レベルにおいて下記の実験を行った。

- 1) 梁型試験体によるひび割れ補修効果確認の検証実験
- 2) RC 部材に IC タグを設置するための基礎実験
- 3) ラスモルタル外壁の脱落モニタリングのための基礎実験
- 4) 濡れセンサの試作とこれを用いた結露・漏水の識別実験

以上の成果は構造物の長寿命化のための診断技術として極めて有効と考えている。

4. 研究成果

ここでは、前節に示した研究のうち、代表的な研究成果を示す。

1) 鉄骨造建築物における構造的診断

本建築物では、常時微動による振動性の把握、耐震補強効果の確認および強震モニタリングを実施したので、これらの一連の計測から得られた成果を示す。

計測対象の建築物は長方形の平面を有する整形の4階建ての鉄骨造建築物である。

(常時微動計測結果)

図1および図2に各階で計測された常時微動波形のフーリエスペクトルを長手方向について示す。同図に示す長手方向については周期0.394秒に卓越周期が認められ、これが一次固有周期と考えられる。

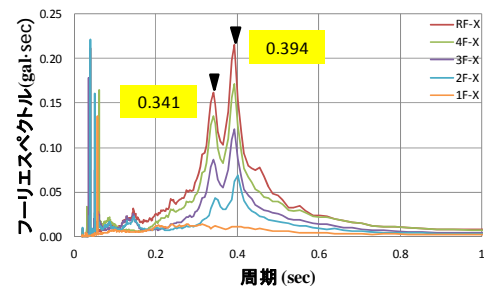


図1 各階の長手方向の常時微動計測波形のフーリエスペクトル

一次固有周期前後の周期でフーリエ逆変換したりサーージュを図2に示す。これらの図には右下に小さく平面内の動きを示しているが、これらの図からこの建築物は長手方向、短手方向ともに大きな偏心はなく一様に振動に振動していることが分かる。

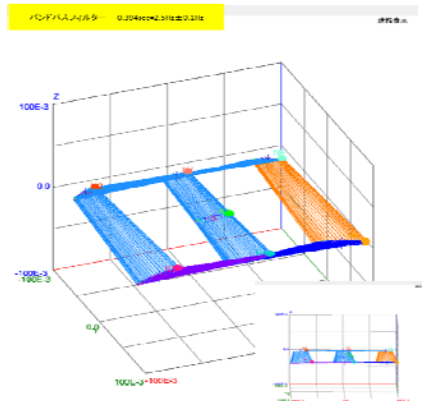


図2 RF平面の長手方向 一次固有周期のリサージュ (バンドパスフィルター 0.394sec=2.5Hz±0.1Hz)

(耐震補強効果の確認)

本建築物は平成23年1月の東日本大震災での大きな振動のために非構造部材の被害を受け、揺れを低減する目的で制震ダンパー設置による耐震補強工事が実施された。この

耐震補強工事中に常時微動計測を行っており、今回、平成24年10月の計測は補強工事後の計測となったため、常時微動の変化による補強効果の確認を行った。表1および図3では建築物の長手方向のフーリエスペクトルを補強前後で比較した。同図より、本計測により補強工事の効果の確認ができた。

表1 補強の完了による固有周期と応答倍率の変化

	長手方向		短手方向	
	一次固有周期	1Fに対するRFの応答倍率	一次固有周期	1Fに対するRFの応答倍率
改修前	0.427 sec	32.7倍	0.500 sec	44.6倍
改修後	0.394 sec	18.7倍	0.445 sec	31.8倍

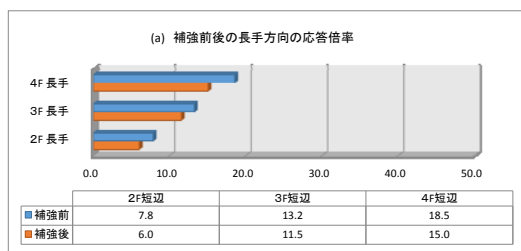


図3 補強の完了による各階の長辺方向の応答倍率の変化

なお、本計測も含め本研究では実構造物について多くの計測の実績を有しており、センサの設置から計測終了までの時間は有線式センサを用いる場合に比べて大幅に時間短縮が可能であり、計測時間も極めて少ない。このシステムの活用により多くの構造物のデータを収集できることは構造物の安全性や耐久性に関する診断技術を高めることに極めて有効であることを明らかにした。

2)建築物の非構造部材の診断

ここでは、長期優良住宅のモデル建築物として建設された住宅におけるサイディング材の耐久性診断を実施するための実験計測結果を示す。

建物の外壁は太陽光、風雨、雪、気温の変化等、過酷な条件下にさらされている。本研究では、戸建住宅用外壁材の中心素材である窯業サイディングに注目した。

シーリングのはがれや劣化、サイディングのひび割れや接合部のゆるみなどは、雨漏りの原因となり、土台や柱を腐食させてしまう。また、大地震などの自然災害時には、サイディングがひび割れたり、シーリングが切れてしまうこともある。早期に発見するためには、定期的な点検が必要であるが、現在の点検方法は目視によるものであり、ばらつきが存在し、また内部状況は外装材によって覆われているため確認できない。

そこで本計測では、劣化前後の固有周期の変化により定量的な評価ができるのではないかと考え、無線加速度センサを用いた健全度評価方法について検討する。最終的な目標

は、振動計測により、劣化の有無や程度、箇所特定である。

写真1に示すように、外壁サイディング材に貼り付け、サイディング材を軽く打撃することにより、部材の加速度と周波数特性を計測した。

(シーリング材の劣化に関する実験結果)劣化前後の代表的な固有周期を抽出し、図4で比較した。同図に示すように劣化後はサイディング材の振固有周期が大きくなることが確認された。



写真1 MEMS加速度センサの設置状況

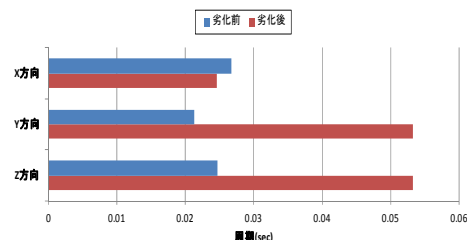


図4 シーリング材劣化前後のサイディング材の周期の変化

以上のように、サイディング材の固有周期の経時変化の計測から、シーリング材の劣化を推測できることが明らかとなった。打撃の与え方の改良を加えれば振幅を判断材料に加えることが可能であり、劣化の進行をさらに精度よく推測できるものとする。

(ひび割れによる劣化に関する実験結果)

劣化前後の代表的な固有周期を抽出し、図5で比較した。同図から明らかなように、劣化(ひび割れ)を生じさせる前と後では固有周期が大きく変化しており、サイディング材のひび割れを加速度センサで検知することの見通しが得られた。

本研究では、他にも天井材の振動性状から

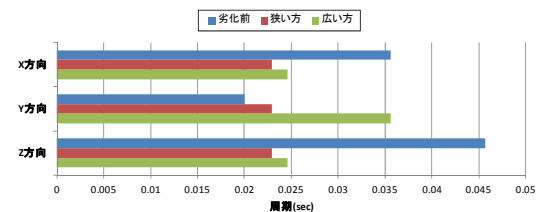


図5 ひび割れ発生前後のサイディング材の周期の変化

天井の取り付け方法に関する診断についても検討を行っており、MEMS 加速度センサによる診断システムの実用化に関する有益な知見を得た。

3) IC タグによる情報保管技術

構造物の長寿命化のための維持管理を高度化するためには、生産情報の保管が重要となる。本研究では、現場で簡便に情報入手する技術として IC タグを活用する技術開発を実施した。ここでは主要な成果を示す。

コンクリートに投入して使用する IC タグの試験方法や物性評価方法は確立されていないため、まず評価手法を検討することが必要である。図6にコンクリート製造時に投入して維持管理まで活用することを想定した IC タグに要求される主要な品質を示す。IC タグには製造、施工および供用環境下で物理的に壊れないこと、コンクリートに悪影響を及ぼさないことが要求される。このような要求条件を踏まえて、IC タグ単体(表2)およびコンクリートに埋設した場合について物理試験方法を考案し、実際の IC タグの物理的性能について検討した。

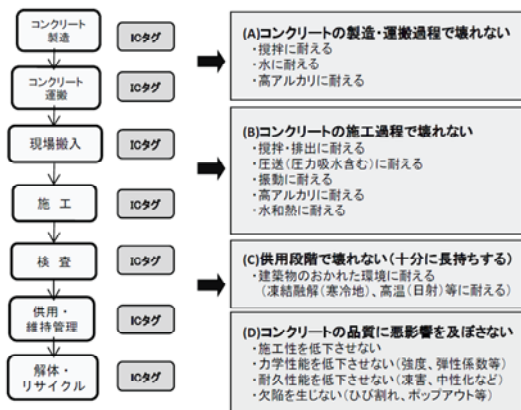


図6 コンクリートに投入するICタグに要求される品質

以下のような知見を得た。これらの知見をまとめると以下のようになる。

- 1) IC タグの通信指向性に関しては、IC タグによっては読取りが行えない方向が存在することが明らかとなった。コンクリート製造段階で投入する IC タグとしては好ましくない
- 2) IC タグがフレッシュコンクリート中に投入されることを想定した耐水性試験については、すべての IC タグとも通信性、形状変化に異常は認められなかった。
- 3) IC タグがマスコンクリートに投入されることを想定した耐熱性試験では、全ての IC タグについて通信性能が低下しなかった。ケース樹脂が変形した IC タグも認められた。
- 4) IC タグを気中または水中で凍結融解サイクルを 50 回繰り返した状態では

表2 本研究で実施したICタグに関する試験

実験記号	試験項目	実験要因	試験方法
1-a	ICタグの読取り性能	ICタグの読み取り距離に関する基本性能の検討	ICタグのデータの通信距離(読み込みできる最大距離、書き込みできる最大距離)の計測を行う。
1-b	指向性	コンクリート部材中でICタグの方向をコントロールできないことへの検討	通信距離の変化、指向性を検討するため、ICタグの表面および裏面から90°、60°、45°、30°、0°の角度で読み取る(写真1参照)。
1-c	耐水性(耐アルカリ水溶液)	練混ぜ、運搬時に水中(セメントペースト)中に置かれることへの検討	20℃の水中にICタグを7日間浸漬し、通信性およびICタグの外形変化を観察する。また、NaOHを用いてpH=13のアルカリ水溶液中でも上記と同様の試験を行う。
1-d	耐熱性	マスコンクリートなど、セメントの水和発熱によるコンクリートの温度上昇に対する検討	100℃の水中に15分間ICタグを浸漬して、通信性およびICタグの外形変化を観察する。また、80℃、100℃の空气中に7日間放置したICタグについても同様の計測を行う。
1-e	耐凍害性	冬期に施工されることや寒冷地での使用に対する検討	水中および気中で-20℃(2時間)、+20℃(2時間)を1サイクルとして50サイクル繰返した後、通信性およびICタグの外形変化を観察する。
1-f	耐摩耗性	練混ぜ、運搬時において骨材と混練されることによることに対する検討	パン形の強制練りミキサーで砕石・砕砂とともに60Hzの回転数で3分間かく拌し、さらに6Hzの回転数で90分間アジテートした後、ICタグの通信性および外形変化を観察する。

通信性能の低下、外観変化ともに認められなかった。

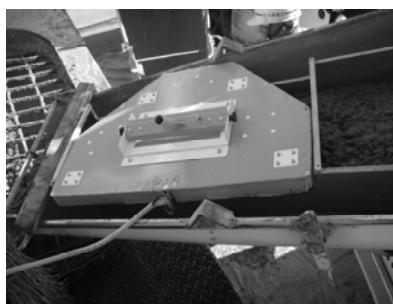


写真2 実際の工事現場におけるICタグ投入実験の様子

耐摩耗性試験では、すべての IC タグについて通信性能が低下することはなかったが、ケースが破断した IC タグもあった。

以上の実験室内レベルの試験を基盤とし、実際の建築工事現場で実証実験を行った。写真2がその様子である。IC タグはコンクリートと共に、ミキサからアジテータ車、コンクリートポンプ車やバケット、そして型枠へと移動していく。したがって、トレーサビリティ確保の観点からは、各段階で RFID タグが

コンクリートと共に移動したことを確認する必要がある。具体的には、RFID タグが①アジテータ車のシュートを通過して排出されたこと、②圧送時に輸送管を通過して型枠へ移動したこと、の確認が必要である。以上の観点から、コンクリートの流動状態を実験的に再現して、通信性能評価を実施した。また現場実験でも同様の検討をおこない、評価の妥当性を検証した。その結果、試験結果で予想されたタグ捕捉率と現場実験での結果(約30%)がおおむね一致したことから、提案手法の妥当性を確認した。また、コンクリートが流動している場合、タグはある程度発見可能であるが、内部データの読み取りは現状では不可能であることを示した。

4) IC タグの通信性能を活用した鉄筋腐食探査

鉄筋コンクリート部材内の鉄筋の腐食診断技術に対する社会的要請は大きい。本報では、RC 部材に RFID タグを埋設しておき、その通信性能を定期的に測定することで、埋設位置近傍の鉄筋腐食を非破壊に検知できることを見出した。図8に結果の例を示す。通信最大距離や通信成功率のいずれの指標を用いても、鉄筋単体試験体、RC 試験体共に、鉄筋の腐食とともに通信性能は増加することを確認した。また、磁界強度測定によって、現象の要因の一つが、鉄筋の腐食による導体部分の減少に伴うリーダーライタから RFID タグへの電力供給増にあると推察した。以上の検討から、埋設された IC タグを用いて鉄筋の腐食検知が可能であることを示した。

さらに、著者らの提案する“通信成功率”を指標とすることで、腐食の有無だけでなく腐食の進行(腐食量の変化)についても検知できる可能性を見出した。また、腐食検知に用いる「鉄筋腐食による通信性能の向上」現象は、鉄筋の腐食による導体部分の減少が、リーダーライタから RFID タグへの電力供給量増加をもたらすことが主要因であることを、磁界強度測定を通じて示した。

5) 濡れセンサの試作と室内実験

雨漏りや結露発生は建築物の劣化原因であり対策工事や法的対応が異なる。したがってこれらの判別技術が必要である。小屋裏における液水の発生を想定し、センサを用いた短期モニタリング測定によって漏水、結露などの原因を推定・診断するシステム開発を最終目標とした。

図9に実験結果の例を示す。液水の検知後の

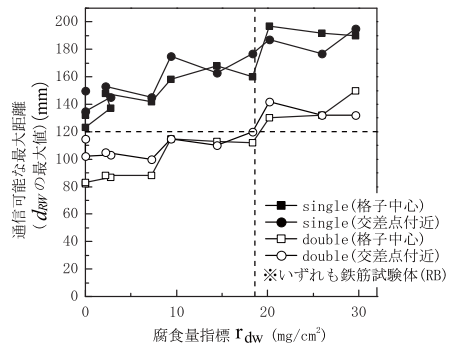


図7 腐食量指標 Γ_{dw} と通信可能な最大距離の関係

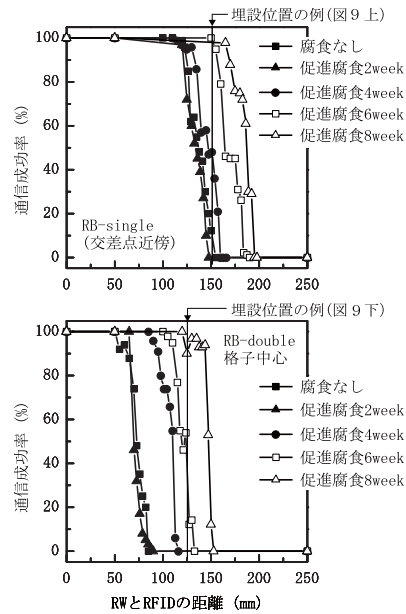


図8 促進腐食日数ごとの通信成功率の経時変化

センサ出力の変化(上昇速度や上下)には定性的な違いが観察された。これを利用した結露発生と雨漏りの判別を提案した。

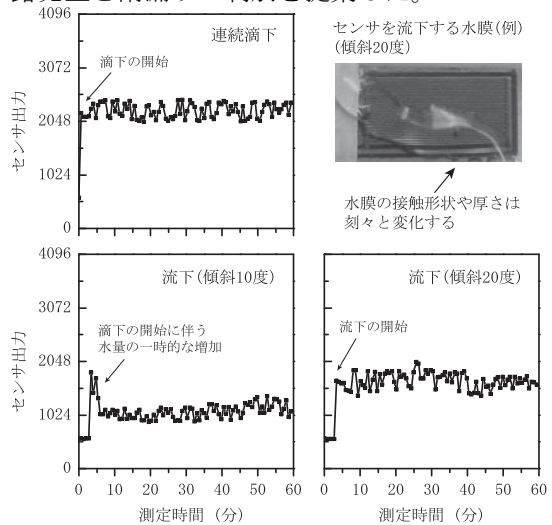


図9 濡れセンサによる濡れの検知試験

以上、本研究により、下記を明らかにした。
(a)本研究で開発した無線加速度 MEMS センサにより、構造物の振動性状、地震や交通振動を精度よく計測でき、構造物の長寿命化のための診断システム基盤を構築した。
(b)IC タグを用いた構造物の維持管理の高度化のための情報保管・入手システムの実用化の基盤を構築し、一部実用化を達成できた。
(c)無線および NFC 技術を活用した濡れセンサの試作を行い、実用化のための基礎実験を行い、その見通しを得た。
(d)IC タグの通信性を活用したコンクリート中の鉄筋腐食のモニタリングの可能性を実験室レベルで検証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 26 件)

- (1)藤本聡史, 大久保孝昭, 吉峰侑吾, 平原悠生, 流動する生コンクリート中における RFID タグの通信性能評価および実地試験, 日本建築学会技術報告集 第 19 巻 第 41 号, pp7-12, 2013 年 2 月 (査読有り)
- (2)藤本聡史, 吉峰侑吾, 平原悠生, 大久保孝昭, パッシブ型 RFID タグ・センサを鉄筋コンクリート部材に埋設する場合の信頼性能評価法, および壁・スラブ部材への適用, 日本建築学会構造系論文集 第 78 巻 第 684 号, pp241-250, 2013 年 2 月 (査読有り)
- (3)大久保孝昭, 松浦辰彦, 松本慎也, 中村洋行, MEMS 無線加速度センサを用いた建築物の診断技術, 第 11 回韓国・日本建築材料施工 Joint Symposium 論文集, 2012.9, pp265-270 (査読無し)
- (4)隈部 佳, 原田 悟, 岩田 道敏, 大久保孝昭, 高橋脚を有する橋梁の新幹線走行に伴う振動について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 2, 2012, 6, PP919-925 (査読有り)
- (5)大久保孝昭, 藤本 郷史, 吉峰 侑吾, 杉山 央, 角倉 英明, 古賀 純子, コンクリートのトレーサビリティ確保のための IC タグの活用技術—製造時に投入する IC タグの評価—, 日本建築学会技術報告集 第 18 巻 第 38 号, pp31-36, 2012 年 2 月 (査読有り)
- (6)大久保孝昭, 住宅の補修技術の現状に関する私見, 消費者法ニュース 86, pp224-226, 2011. 1 (査読無し)
- (7)大久保孝昭, 無線センサ技術の診断への活用, 第 33 回情報・システム・利用・技術シンポジウム, (社)日本建築学会 情報システム技術委員会, pp193-195, 2010. 12 (査読有無し)
- (8)松本慎也, 本川英治, 藤井大地, 大田和彦, 在永末徳, 大久保孝昭, ポータブル無線加速度計と衝撃型起振機を用いた振動特性

評価システム—木造実験住宅での検証—, 日本建築学会技術報告集, 第 16 巻, 第 34 号, pp1187-1192, 2010. 10 (査読有り)

(9)大久保孝昭, 松浦辰彦, 松本慎也, 藤本郷史, 無線情報技術による維持管理の合理化に関する研究, 第 10 回韓国・日本建築材料施工 Joint Symposium 論文集, 2010.9, pp91-96 (査読有無し)

(10)大久保孝昭, 無線情報技術による維持管理の高度化, コンクリート工学, Vol. 48, No5, pp141-144, 2010. 5 (査読有り)

〔学会発表〕(計 2 件)

(1)大久保孝昭, 無線情報技術の活用による構造物の維持管理の合理化, 広島大学プロジェクトセンター講演会, 広島大学産学連携センター, 2010. 8. 4

(2)大久保孝昭, 無線振動モニタリングシステムを活用した建築物の構造安全性と耐久性評価技術の開発広島大学地域貢献研究成果発表会, 広島大学中央図書館 2011. 7. 28

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大久保 孝昭 (OHKUBO TAKAAKI)
広島大学・工学研究院・教授
研究者番号: 6 0 1 8 5 2 2 0

(2) 研究分担者

松本 慎也 (MATSUMOTO SHINYA)
近畿大学・工学部・准教授
研究者番号: 3 0 3 2 5 1 5 4

藤本 郷史 (FUJIMOTO SATOSHI)
広島大学・工学研究院・助教
研究者番号: 3 0 4 6 7 7 6 6

(3) 連携研究者 なし