

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420508

研究課題名(和文) 常時微動測定による近世城郭石垣の健全性評価技術の開発

研究課題名(英文) Development of health monitoring method for stone wall of modern castles by microtremor

研究代表者

山中 稔(YAMANAKA, Minoru)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：50264205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：近世城郭石垣の健全性を評価する手法として常時微動測定を提案し、現存する四国内2か所の城郭石垣を対象とした常時微動測定等により、石垣の振動特性を解析評価することで、石垣の健全性評価技術を開発することを目的としている。

本研究の結果、高知城石垣を対象としては、石垣部の振動特性は固有周波数が大きいほど増幅率は小さくなること、石垣部の増幅率は石垣部下断面の地山深さや石垣部上段面の地盤状態の影響を強く受けていることが明らかとなった。一方、丸亀城を対象としては、目視判断による変状とH/Vスペクトル比率の大きさが調和的であることが見いだされた。常時微動測定は城郭石垣の健全性評価に有効な手法であることが判明した。

研究成果の概要(英文)：It's necessary to estimate stability of a stone wall of Japanese modern castle in order to maintenance adequately against some natural disaster such as a heavy rain or a big earthquake.

In this study, many microtremor measurement were carried out at stone walls of Kochi and Marugame castles in order to develop of a health monitoring method for stone wall of modern castles by microtremor.

As a result of this study, the vibration characteristic in the stone wall was cleared that the gain was so small that the natural frequency was big for Kochi castle, and was revealed that and a deformation by watch observation and a value of H/V spectrum were harmonized each other. Therefore, it can be said that the microtremor is very useful as a health monitoring method for stone wall of modern castles.

研究分野：地盤工学

キーワード：石垣 地盤調査 物理探査 常時微動 耐震性 維持管理

1. 研究開始当初の背景

現存する近世城郭石垣は構築から古いもので400年以上が経過し老朽化が著しいものが多く、崩壊の危険性が高いと判断される箇所も少なくない。崩壊の危険性が最も高い現象は、石垣のはらみやゆるみである。はらみやゆるみは、石垣に作用する背面からの土圧が局所的に大きくなり生じることが多いが、この土圧の局所的な増大を引き起こす原因として、裏込石の層厚が部分的に薄くなっていることが多く見受けられる。

石垣は一般的に地震に強いと言われていたが決してそうではなく、近年では2009年の駿河湾沖の地震による駿府城の石垣崩壊や、2011年の東北地方太平洋沖地震による白河小峰城や仙台城などで石垣崩壊が生じているが、いずれも裏込石の層厚が薄い箇所で崩壊が大きかったことが報告されている。すなわち、裏込石の層厚が変化する箇所で、常時の水平土圧が大きくなり静的安定性が低下するとともに、相対的に剛性が減少し地震時に揺れが増大され動的安定性が低下するものと考えられる。

城郭石垣は歴史的文化財としての価値が高く、老朽化対策として各地の城郭で石垣の維持管理、修復・復元などの工事が実施されている。あるいは工事にまで至らなくとも石垣の安全性確認のために、石垣変形状の3次元測量や、石垣背面構造を知るための石垣表面からのレーダ探査が実施される。写真測量では石垣の形状や時間経過に伴う変状を把握するに過ぎない。一方、レーダ探査では石垣の奥行き長さや、裏込石や空洞の分布状況など重要な情報を得ることができるが、得られる情報は線的な情報に過ぎず、長い面的構造物である石垣の静的および動的な安定性(健全性)を総合的に評価するには不十分である。

2. 研究の目的

城郭石垣は歴史的文化財としての価値が高く、老朽化対策として各地の城郭で石垣の維持管理、修復・復元などの工事が実施されている。研究代表者は、高松城での石垣解体工事の前後において石垣天端での常時微動測定を実施し、安定性の低い石垣部では卓越周波数が減少すると共に増幅率が大きくなるという重要な結果を得た。

本研究では、近世城郭石垣の健全性を評価する手法として常時微動測定を提案し、現存する四国内2か所の城郭石垣を対象とした現地調査により、石垣の振動特性を解析評価することで、石垣の健全性評価技術を開発するものである。

3. 研究の方法

城郭石垣の維持管理に必要な健全性評価技術の開発を目的として、四国内の2箇所(高知城、丸亀城)の城郭石垣を対象として、石垣部での常時微動測定等の物理探査や、石垣

背後の裏込め盛土での常時微動測定や動的貫入試験を実施する。常時微動測定結果の卓越周期や増幅特性等の違いを指標として、石垣及び盛土の変状箇所の抽出を行うと共に、他の調査結果や既往の施工記録等を参考にして、異なる振動特性の要因を検討する。

1) 高知城での測定方法

図-1に、高知城における常時微動測定位置を示す。測定位置は、石垣の積み方、角形状、高さ、場所の違いを検討するために10m間隔で広範囲に設定した。測定は3成分型サーボ型加速度計を内蔵した微動計 McSEIS-MT NEO を用いた。微動計は、石垣部の構造を勘案してぐり石範囲にあたる石垣から2m程度内側に設置した。この際、石垣部直交方向の振動に着目するため、加速度計のN-S成分が石垣部に直交するようにした。図中には、後述する増幅率の高い箇所を併記している。



図-1 高知城内での常時微動測定位置

図-2に、一例として三の丸跡の石垣部と地山部の周波数とH/Vスペクトル比の関係を示す。スペクトルは、バンド幅0.3HzのParzen windowにより平滑化を行った。石垣部では5.5HzでH/Vスペクトル比のピークが現れているのに対して、地山部ではこの周波数帯においてH/Vスペクトル比の明瞭なピークは現れていない。他の石垣においても同様の傾向が得られたため、周波数5~10Hzを石垣部に相当する固有周波数とし、その周波数帯におけるH/Vスペクトル比のピークをその石垣部の増幅率とした。

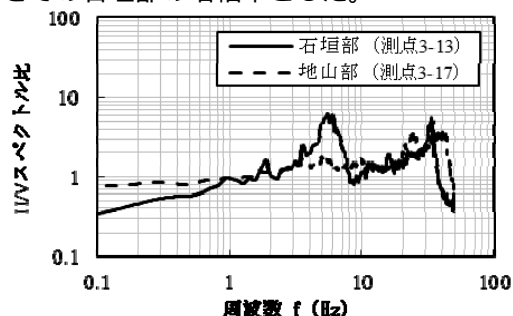


図-2 石垣部と地山部の振動特性

2) 丸亀城での測定方法

図-3に、丸亀城の地質図を示す。丸亀城は標高66mの亀山を利用した山城であり、1602年に築城し、本丸、二の丸、三の丸、帯曲輪の4重の構造からなり、その4重の石垣の累計高は日本一の高さを誇っている。丸亀城の基盤岩は主に安山岩であり、南西側に花崗岩の分布が見られる。また、丸亀城北部および南西部は若干の谷地形となっており、石垣出角部(櫓跡部)は尾根部に位置することから、地形を利用して構築されている。

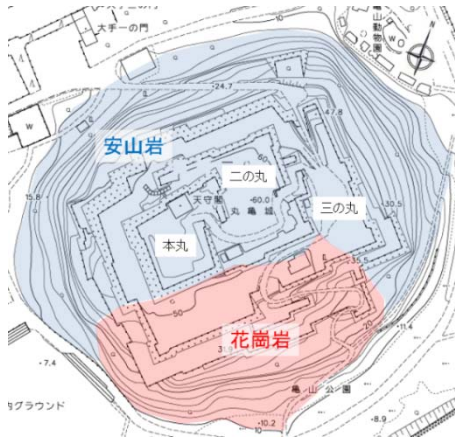


図-3 丸亀城地質図

図-4に、常時微動計の設置箇所の模式断面図を示す。常時微動計(McSEIS-MT NEO)は、石垣石上と栗石上に設置するとともに、測定時期の違いの影響を取り除くために石垣から可能な限り離れた箇所に基準点として1台設置し、計3箇所ですべて同時測定を行った。石垣石上は石垣石の真上、栗石上は石垣石から2m程度内側に離れた地点としている。微動計の設置間隔は水平距離5m間隔と設定し、1箇所あたりの計測時間は通行人の歩行による振動の影響を考慮して、約1時間の計測で行った。また、石垣の直交方向の揺れに着目するために、加速度計のN-S成分が石垣部に直交するようにした。常時微動測定は、丸亀城東側を除く計273箇所で行った。

常時微動 H/V スペクトルはバンド幅 0.3Hz の Parzen window により平滑化を行った。各測定箇所の H/V スペクトル比を基準点の H/V スペクトル比で除した(正規化)ものを H/V スペクトル比率とした。

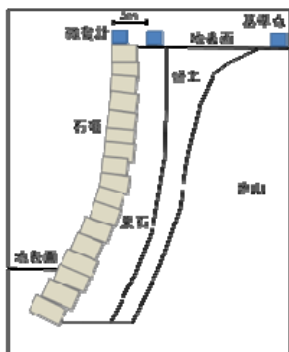
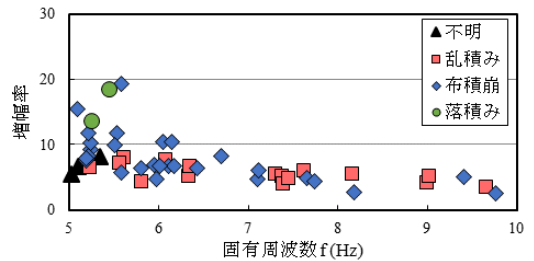


図-4 常時微動計の設置箇所

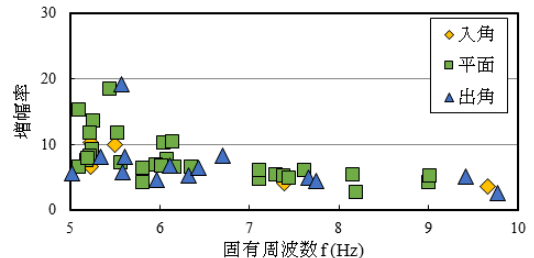
4. 研究成果

1) 高知城での成果

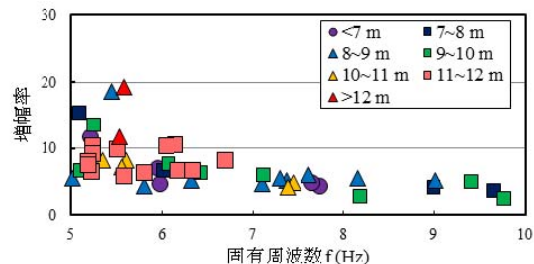
図-5(a)~(d)に、高知城石垣部全体の固有周波数と増幅率の関係を石垣の積み方、角形状、高さ、場所で分けたものを示す。(a)図では、石垣の積み方が比較的密な乱積みから、布積崩、落積みへ粗い積み方へと変化していくに連れて固有周波数は小さく、増幅率は大きい。(b)図では、入角部の増幅率がわずかに小さい。また、(c)図では、高さ11m以上の石垣部は固有周波数、増幅率ともに小さい値にまとまっているが、その他の石垣では石垣高さと振動特性に明瞭な関係性は見られない。(d)図では、三の丸跡の石垣部の固有周波数は5.0~6.5 Hzにあり、天守台跡、二の丸跡、北西石垣の順に固有周波数が小さく、増幅率が大きくなっている傾向が見られる。これらのことから、石垣部の振動特性は石垣の積み方と石垣背後や石垣底面の地盤状態の影響を受けていることが考えられる。



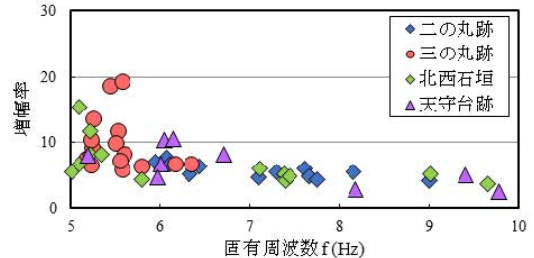
(a)石垣の積み方による違い



(b)石垣の角形状による違い



(c)石垣の高さによる違い



(d)石垣の場所による違い

図-5 固有周波数と増幅率の関係(高知城)

増幅率の高い三の丸南側は、2004年～2010年度に実施された石垣改修工事の範囲内である。また、改修工事に先駆けて行われた地盤調査によって、谷埋め盛土で造成された箇所であると考えられている²⁾。三の丸南部石垣の裏込め土の相対的な緩みや、谷埋め盛土の厚さ(地山までの深さ)が増幅率の大きさと関係していると考え、三の丸石垣部の上段面と下段面で表面波探査を実施した。

図-6に、三の丸石垣部の下段面で実施した表面波探査によるS波速度構造断面図より読み取った地山($V_s > 300$ m/s)までの深度と、上段面での常時微動測定による石垣部の増幅率との関係を示す。地山深さが深くになるにしたがい、すなわち表層部の層厚が厚くなるにしたがい、石垣部の増幅率が上昇していることが分かる。

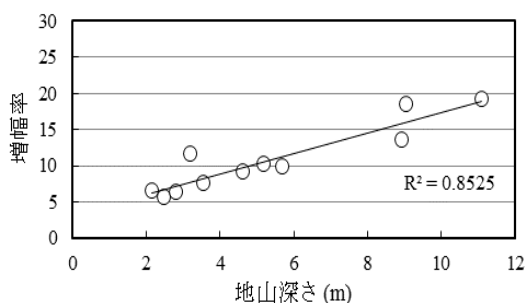


図-6 三の丸石垣下段面での地山深さと石垣上段面の増幅率の関係

図-7に、三の丸石垣上断面における地盤の平均S波速度(地表面から3m, 5m, 10mの各範囲)と石垣部の増幅率との関係を示す。地山の平均S波速度が大きくなるほど(地盤が硬質なほど)、増幅率が低下する傾向を表しており、その相関はいずれの深度でも比較的高い決定係数を示していることが分かる。

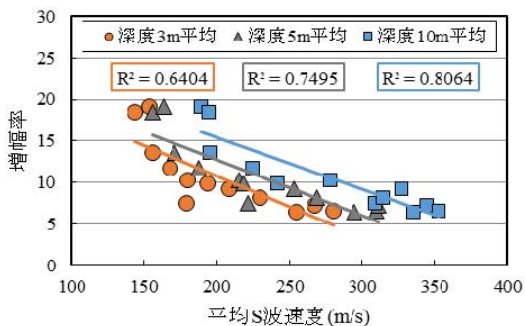
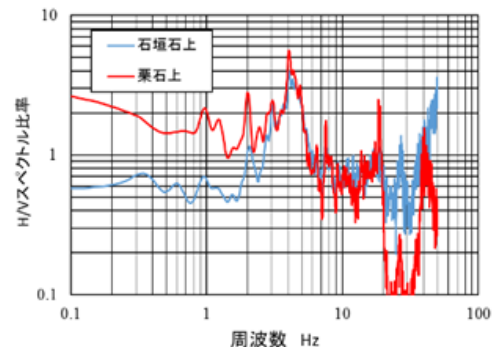


図-7 三の丸石垣上段面における地盤の平均S波速度と石垣部の増幅率の関係

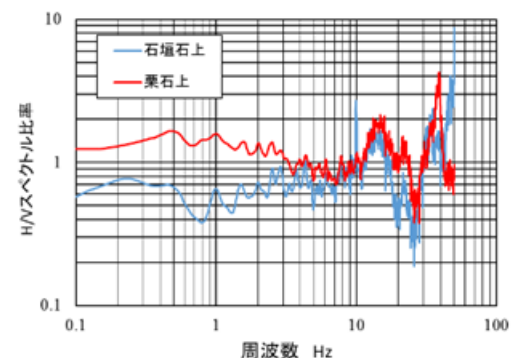
高知城での研究の結果、石垣部の振動特性は固有周波数が大きいほど増幅率は小さくなること、石垣部の増幅率は石垣部下断面の地山深さや石垣部上段面の地盤状態の影響を強く受けていることが明らかとなった。

2) 丸亀城での成果

図-8(a)(b)に、一例として目視判断による変状が大きい箇所と小さい箇所のH/Vスペクトル比率の違いを示す。変状が大きい箇所では5Hzにピークが現れているが、変状が小さい箇所ではその付近に明瞭なピークは見られない。他の箇所においても同様の傾向が得られたため、4～10Hzを石垣に相当する固有周波数帯とし、その周波数帯におけるH/Vスペクトル比率のピーク値を増幅率とする。



(a) 変状が大きい箇所 (No. W3-27)



(b) 変状が小さい箇所 (No. W3-10)

図-8 石垣部の変状の大きさによるH/Vスペクトル比率の違い(丸亀城)

石垣石上と栗石上のH/Vスペクトルと卓越周波数を比較したところ、両者の卓越周波数は概ね一致していたが、H/Vスペクトル比率では栗石上の方が大きい傾向があった。つまり、栗石上の方が揺れやすいと考えられる。

図-9に、三の丸石垣部における増幅率を示す。増幅率はW3-3地点からW3-17地点では小さいが、W3-23地点からS3-3地点になると大きい。また、石垣面の方向別の増幅率の関係では、西側は2～3程度と小さいが、南側になるにしたがい4～6程度と大きくなっている。また、同じ方向の石垣面であっても、増幅率に違いがみられる。

図-10に、目視判断による実際に変状が大きい箇所と増幅率との関係を示す。実際に変状が大きい箇所は測定範囲の6割程度を占めていたことから、増幅率の程度分布図を作成し、超過率6割を示す増幅率として3.5以上の箇所を変状が大きい箇所として抽出した。変状が大きな箇所との一致程度を判断すると、赤の測点箇所(58箇所)のうち38箇所、

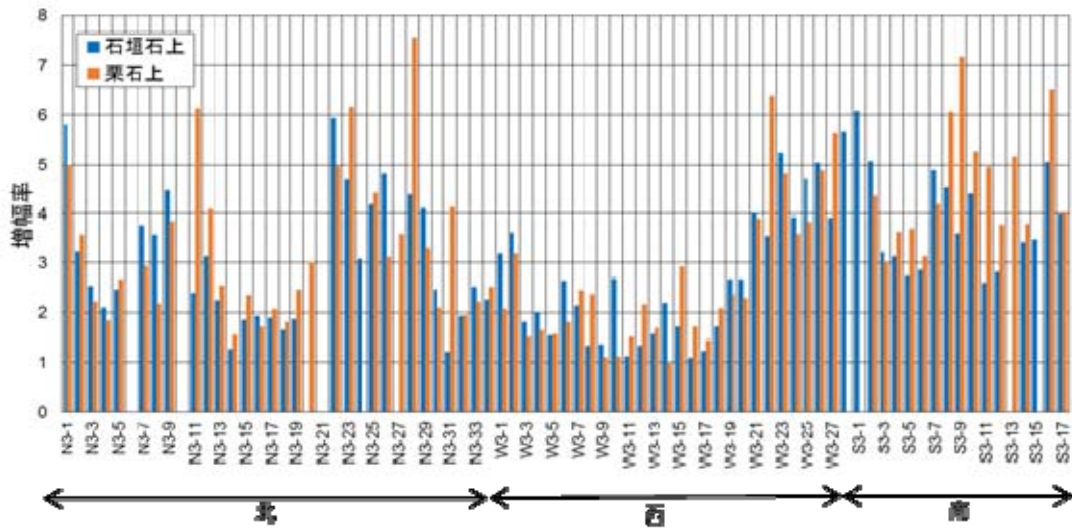


図-9 三の丸石垣部（石垣石上，栗石上）における増幅率の違い（丸亀城）

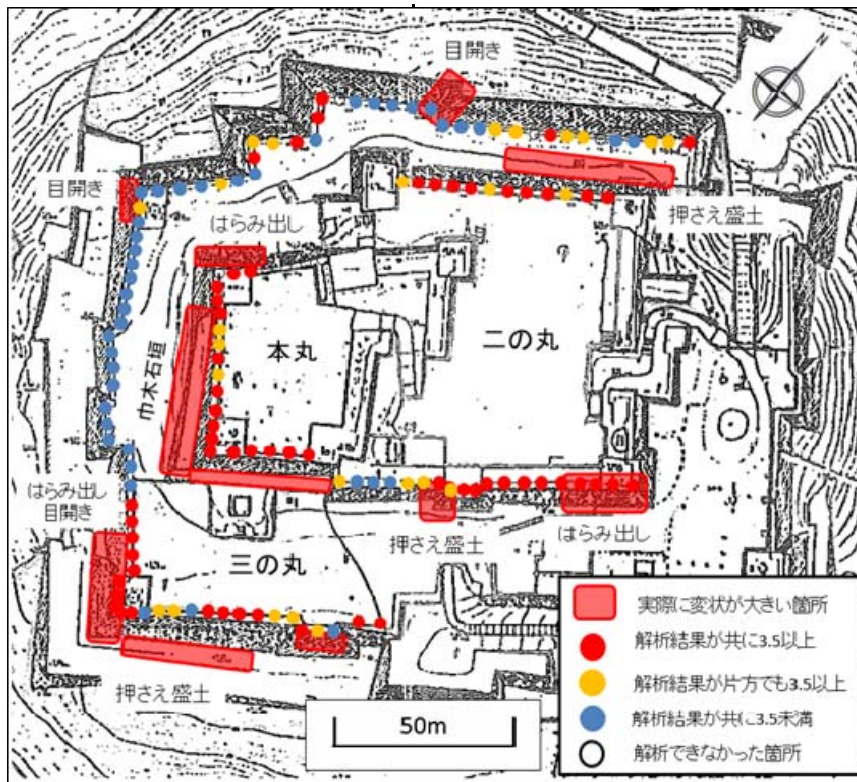


図-10 実際に変状が大きい箇所と増幅率の関係（丸亀城）

黄の測点箇所（25箇所）のうち11箇所，青の測点箇所（41箇所）の内6箇所が一致した。このことから，H/V スペクトル比率による手法は変状箇所を概ね抽出できたと言える。

石垣の変状が多い箇所は，図-3 に示す花崗岩の範囲に多い傾向が見られ，変状が大きく発生している要因の1つとして基盤が花崗岩であることが考えられる。花崗岩は安山岩よりも風化によって土砂化しやすいことから，石垣部の変状要因として，花崗岩の風化が影響している可能性がある。

丸亀城石垣部を対象とし常時微動測定を実施し，H/V スペクトル比率の解析手法を用

いた結果，まず石垣石上と栗石上での卓越周波数の関係は概ね一致していたが，増幅率では栗石上の方が石垣石上よりも大きくなっている傾向にあった。また，目視判断による実際に変状が大きい箇所と比較すると，解析結果は変状が大きい箇所と概ね一致していることから，H/V スペクトル比率による手法は変状箇所抽出に相当であると考えられた。増幅率が大きくなっている地点は，花崗岩の風化の影響があることが示唆された。

5. 主な発表論文等

(3)連携研究者
なし

〔雑誌論文〕(計 1件)

山中 稔, 長谷川修一, 大嶋和則, 西田一彦: 高松城天守台解体修理工事における地盤調査と石垣部の変形解析, 土木学会論文集 C (地圏工学), 12p. (掲載決定済)

〔学会発表〕(計 5件)

石垣隼士, 山中 稔, 小泉勝彦, 長谷川修一: 丸亀城における石垣変状部の振動特性について, 第51回地盤工学研究発表会平成28年度発表講演集, 岡山県岡山市, 2016.9.

石垣隼人, 山中 稔, 長谷川修一, 田中達也: 常時微動測定による丸亀城石垣部の振動特性の把握, 地盤工学会四国支部平成27年度技術研究発表会講演概要集, 香川県高松市, pp.7-8, 2015.11.

山中 稔, 西脇大祐, 小泉勝彦, 長谷川修一: 常時微動測定による高知城石垣部の地震時不安定箇所を検出について, 第50回地盤工学研究発表会平成27年度発表講演集, 北海道札幌市, pp.203-204, 2015.9.

石井 裕, 山中 稔, 小泉勝彦, 長谷川修一: 高知城石垣部の個別要素法による自重および動的変形解析の試み, 平成27年度土木学会四国支部第21回技術研究発表会講演概要集, pp.353-354, 香川県高松市, 2015.5.

西脇大祐, 山中 稔, 小泉勝彦, 長谷川修一: 高知城石垣部の常時微動特性について, 地盤工学会四国支部平成26年度技術研究発表会講演概要集, 徳島県神山町, pp.5-6, 2014.11.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0件)

取得状況 (計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

山中 稔 (YAMANAKA, Minoru)

香川大学・工学部・教授

研究者番号: 5 0 2 6 4 2 0 5

(2)研究分担者

長谷川 修一 (HASEGAWA Shuichi)

香川大学・工学部・教授

研究者番号: 0 0 3 2 5 3 1 7