

# 歴史的建造物の防災・減災技術の高度化に向けた調査研究

—建物の振動特性評価及び健全性モニタリングシステム—

山下 航平\*・渡壁 守正\*\*・久保川 淳司\*\*\*・光井 周平\*

(令和4年10月28日受付)

## A Study on Advanced Technologies of Disaster Prevention and Disaster Reduction of Masonry Historical Construction

—Estimation of Dynamic Characteristics and The Structural Health Monitoring System—

Kohei YAMASHITA, Morimasa WATAKABE, Junji KUBOKAWA and Shuhei MITSUI

(Received Oct. 28, 2022)

### Abstract

The aim of this paper is to monitor the dynamic characteristics of masonry historical constructions by Structural Health Monitoring System (SHM). Firstly, dynamic behavior of masonry historical building has been examined by microtremor observation. Natural frequencies and damping ratios for lower modes are also estimated by microtremor tests. Secondly, and most important, dynamic monitoring system has been installed on the buildings. From the recorded structural response under ambient excitation and to earthquakes, the dynamic characteristics of the buildings are identified using Operational Modal Analysis techniques. Further interesting aspect is the managing of such data with genetic algorithm to identify the damage and the variation of the engineering constants. By digitizing the state of the building with a measuring instrument, it is possible to easily and quickly make judgments on repair and renovation.

**Key Words:** Masonry, Historical Construction, Dynamic Characteristics, Microtremor Measurement, Structural Health Monitoring System

### 1. はじめに

近年、日本では、東日本大震災や熊本地震といった災害の激甚化により様々な被害が見受けられる。

一方で、国内には様々な歴史的建造物が現存しており、広島県内にも重要伝統的建造物群保存地区に選定されている宮島町家や旧呉鎮守府庁舎を代表として数多くの建物が残されている。これらの建物の中には老朽化が著しく進んでいるものもあり、耐震性の不足も多く見受けられ

る<sup>1),2)</sup>。また、老朽化のさらなる進行や今後発生しうる自然災害により倒壊・損壊の危険性が高くなることが懸念される。これらの歴史的建造物を後世に伝え残していくためには、建物の現状を把握した上で適切に補修・改修を行うことが必要不可欠である。現在、補修・改修の可否については、目視や打診といった人の手による点検により判断されているが、熟練度や人材、点検時間を要する。そこで、測定器により建物の状態をデータ化し、確認が出来れば、容易かつ短時間で補修・改修の判断をすることが出来る

\* 広島工業大学大学院工学系研究科環境学専攻 大学院生

\*\* 広島工業大学環境学部建築デザイン学科

\*\*\* 広島工業大学工学部電気システム工学科

考えられる。

現在、小型振動センサを特定エリアに複数存在する歴史的建造物群に設置し、それら建物群の振動特性を常時モニタリングすることで、歴史的建造物の劣化や損傷に伴う変化を早期に把握し、優先的に補修・改修に取り組むべき対象建物を容易に判別することを可能にする「建物健全性モニタリングシステム」の構築を進めている<sup>3)</sup>。本研究では、それら歴史的建造物の事前調査として、建物振動特性を把握するため常時微動測定を実施し、得られた結果を報告する。また、対象建物に構築する「建物健全性モニタリングシステム」の概要を記す。

## 2. 対象建築物及び耐震補強の概要

対象建物は広島県呉市に位置する旧呉鎮守府構内にある旧呉鎮守府庁舎と旧呉海軍軍需部需品庫（以下、需品庫と称す）とした。それぞれの建物の外観概要を写真1、写真2に示す。



写真1 旧呉鎮守府庁舎



写真2 旧呉海軍軍需部需品庫

日本遺産の構成文化財に指定されている旧呉鎮守府庁舎は、地上2階、地下1階建てのレンガ造りとなっており、小屋組は木造トラス構造である。

初代の鎮守府庁舎は明治22年に竣工したが、明治38年に発生した安芸灘を震源とした推定規模マグニチュード7.6の芸予地震により2階部分が倒壊した。その後、平屋に改修され、その横に新築されたのが現存する旧呉鎮守府庁舎にあたる。平成10～11年には、耐震・内装改修工事が実施されており、竣工の約1年後に芸予地震（マグニチュード6.7）に遭遇したが被害は見られず、耐震改修が有効に機能している証明となった。

需品庫は、地上2階建てとなっており、造りは旧呉鎮守府庁舎と同様にレンガ造りである。また、小屋組には木造トラスが用いられている。旧海軍時代に軍需品を収容するために建てられた倉庫のうち3棟が現在も海上自衛隊に引き継がれ、現在も倉庫として使用されているが、耐震改修が未着手であり、老朽化の進行や耐震性の不足が懸念される<sup>2)</sup>。

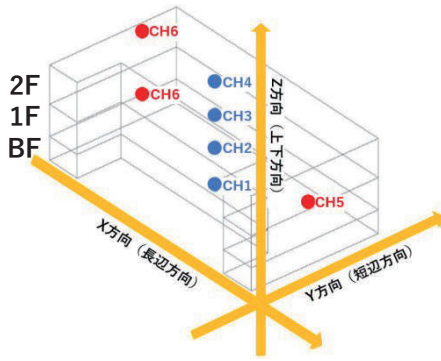
## 3. 常時微動測定による振動特性

### 3.1 測定概要

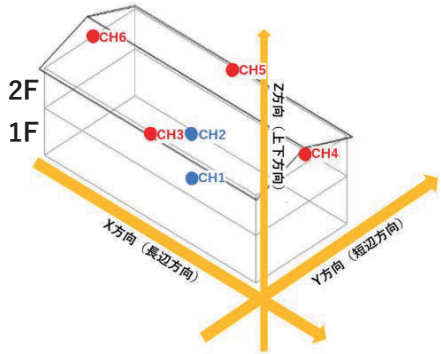
計測は6台の加速度センサを用いて盛替え測定より実施した。測定位置を表1に示す。測定内容は、それぞれの建物のX方向（長辺方向）、Y方向（短辺方向）の並進2方向の測定である。旧呉鎮守府庁舎でのセンサ位置は、図1(a)に示す通りB1F、1F、2F、天井裏の4点とし、2Fにおいては、ねじれの影響を測定するため、X方向の両端（赤丸）にそれぞれ配置している。また、図内の天井CH6は、2FのCH6を盛替え測定した測点である。需品庫のセンサ位置は、図1(b)に示す通り、1F、2F、天井裏の3点とし、ねじれの影響を測定するため、天井裏のセンサは、長辺、短辺の両端（赤丸）にそれぞれ配置している。測定データは、フーリエスペクトル解析とフーリエスペクトル比により建物躯体の固有振動数を推定した。解析にあたっての条件は、サンプリング0.01秒、バンドパスフィルタを0.05Hzとし、3分間のデータをそれぞれ4回計測したデータを用いることとした。

表1 各建物のセンサ設置位置とチャンネル対応

	ケース	ファイル名	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
鎮守府庁舎	X方向	Kure_cx.csv	B1cx	1Fcx	2Fcx	RFcx	RF_xrt	RF_xlt
	Y方向	Kure_cy.csv	B1cy	1Fcy	2Fcy	RFcy	RF_yrt	RF_ylt
需品庫	X方向	Kure_gx.csv	1Fgx	2Fgx	RFgx	RFgx	RF_xrt	RF_xlt
	Y方向	Kure_gy.csv	1Fgy	2Fgy	RFgy	RFgy	RF_yrt	RF_ylt



(a) 旧呉鎮守府庁舎



(b) 旧呉海軍軍需部需品庫

図1 対象建物のセンサ位置

### 3.2 測定記録及び分析結果

旧呉鎮守府庁舎の各測点における加速度波形及び躯体の鉛直方向並進加速度波形より求めたX方向, Y方向でのフーリエスペクトル比の一例を図2, 図3にそれぞれ示す. 1998年に床に水平ブレースを加える耐震補強され, またキングポストラスを用いているなど, 構造的に有利な特徴を有していることもあり, 図3に示す通り高い振動数になっている. Y方向では, はっきりとした卓越振動数が確認できる. このことから旧呉鎮守府庁舎は建物の剛性が高く, 耐震性に優れた建物であることが確認できた.

次に需品庫の各測点における加速度波形及び躯体の鉛直方向並進加速度波形より求めたX, Y方向でのフーリエスペクトル比の一例を図4, 図5に示す. 図5のスペクトル比から, X, Y方向とも明確な卓越が確認できた. Y方向では, 壁面外の複雑な挙動が含まれた卓越振動数が確認でき, 1次から3次まで明確なピークが確認できる. さらに, 3次モード付近でねじれらしきモードの卓越振動数が確認できた. 長手構面が控壁の無い隣接壁間距離が36mの煉瓦壁であること, また2階床面及び屋根面において剛床仮定が成立しないとされる木造の床及び野地板の形式であることが, 旧呉鎮守府庁舎に比べ卓越振動数が小さく

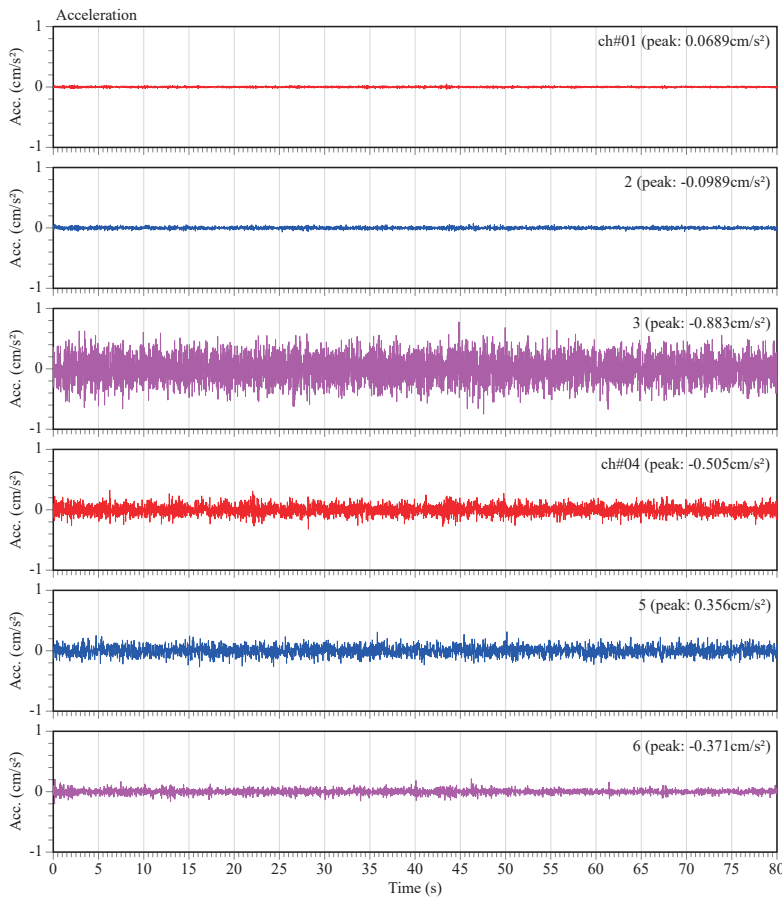
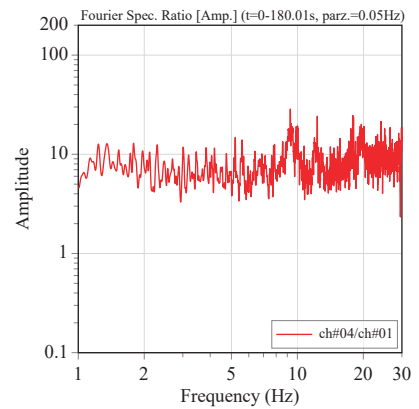
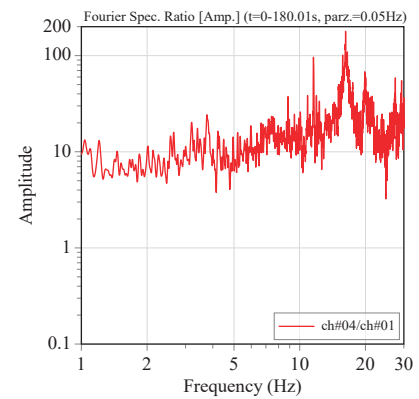


図2 加速度時刻歴波形 (旧呉鎮守府庁舎 X方向)



(a) X方向 (長辺)



(b) Y方向 (短辺)

図3 フーリエスペクトル比 (旧呉鎮守府庁舎)

なっている理由だと考えられ、耐震性を議論する際に問題になると考えられる。

また、X、Y方向の各次固有振動数へのフィッティングより減衰定数を求めた。1次から2次まで明確なピークが

表れていた需品庫のフィッティング結果の一例を図6にそれぞれ示す。モード減衰定数を各次固有振動数と併せて表2にまとめて示す。需品庫のY方向の減衰定数は、高次モードほど減衰が小さくなることが確認できる。

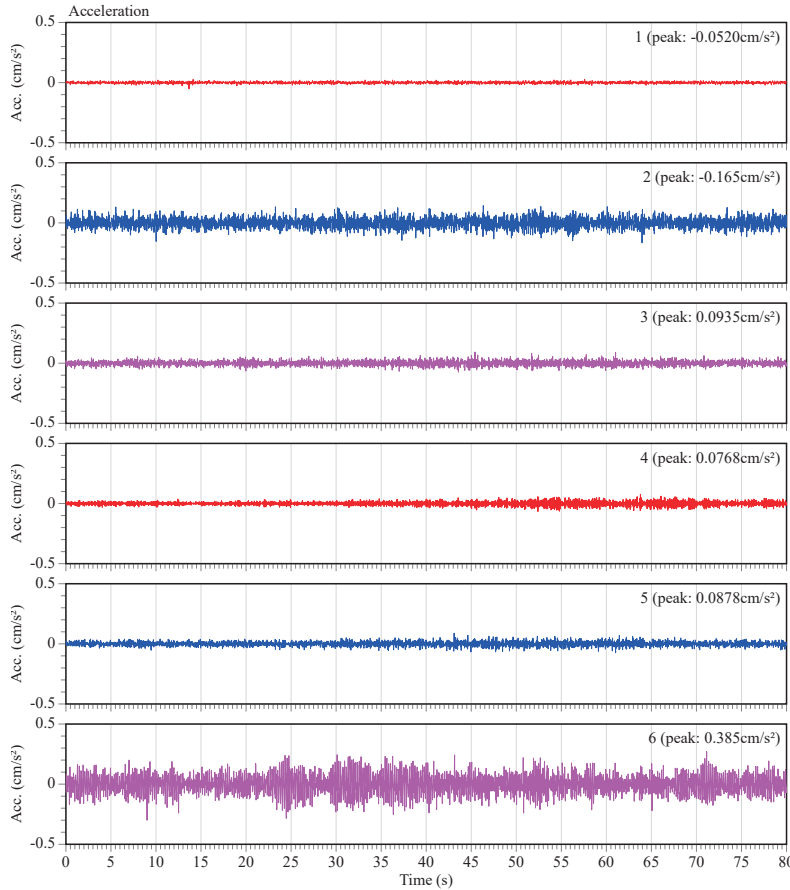
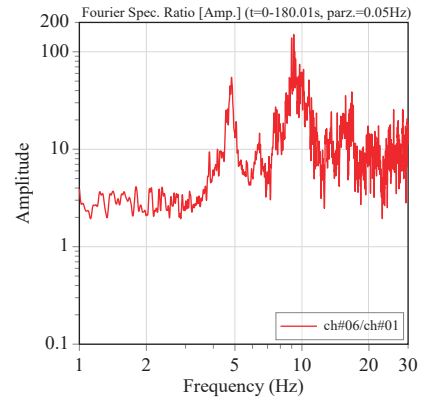
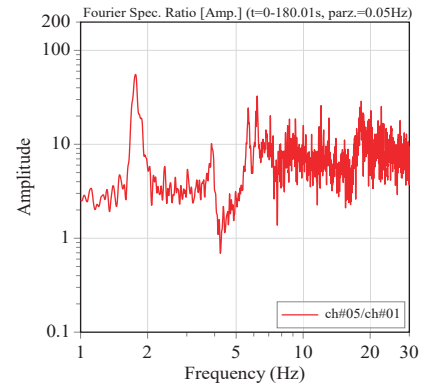


図4 加速度時刻歴波形（需品庫 X方向）

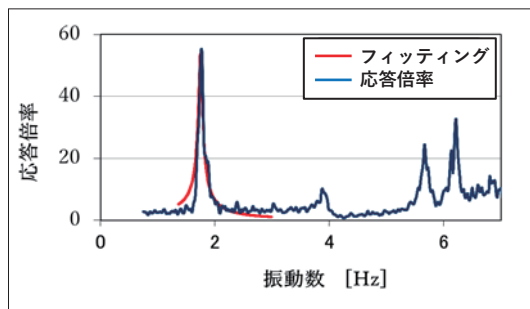


(a) X方向（長辺）

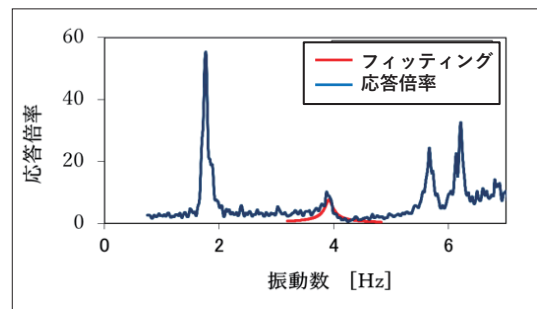


(b) Y方向（短辺）

図5 フーリエスペクトル比（需品庫）



1次モード



2次モード

図6 フィッティングの一例（需品庫：Y方向）

表2 固有振動数と減衰定数

	ケース	固有振動数	減衰定数	固有振動数	減衰定数	固有振動数	減衰定数
		1次	1次	2次	2次	3次	3次
鎮守府庁舎	X方向（長辺方向）	9.84Hz	2.18%	19.57Hz	2.02%	—	—
	Y方向（短辺方向）	11.56Hz	1.03%	16.23Hz	1.21%	19.89Hz	1.39%
需品庫	X方向（長辺方向）	4.83Hz	1.71%	9.19Hz	1.61%	—	—
	Y方向（短辺方向）	1.75Hz	1.89%	3.92Hz	1.65%	5.69Hz	1.00%



## 4. 建物健全性モニタリングシステム構築

### 4.1 MEMS センサを利用した構造ヘルスマニタリング

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 加速度センサは、微細な加工により半導体のシリコンチップ上に形成された超小型デバイスで、数多くのデジタル機器に組み込まれ、高精度で信頼性の高いセンサなど複雑で高度な役割を果たしている。また消費電力が僅かなことから、デジタル機器の小型化、長期間の動作を可能としている<sup>4)</sup>。

本研究ではMEMS 加速度センサとしてテキサスインスツルメンツ社製のADXL355を使用した。本センサはノイズ密度が $2.5\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ で、低ノイズかつ低消費電力という特徴を持つ。加速度は100msのサンプリング間隔でX, Y, Z軸方向の3軸同時計測が可能である。

このセンサを内蔵するセンサボックスのシステムはRaspberry Piで構成され、センサの計測結果をモバイルルータを介して仮想サーバ上のWINシステムに送信することができる。WINシステムは多チャンネルの地震波形データを取り扱うための処理システムであり、東京大学地震研究所が定義したWINフォーマット形式のデータを送受信することができる。

学内の仮想サーバではWINサーバが受け取ったデータを可視化する機能がある。また、WINサーバに保存されているデータの必要部分を選択し、パソコン上に転送することができ、データをCSV形式に変換することで、さま

ざまな解析ソフトウェアで処理することができる。

### 4.2 建物健全性モニタリングシステムの概要

構造ヘルスマニタリング (SHM: Structural Health Monitoring) は遠隔地からリアルタイムに重要な歴史的建造物を監視することで、実測されるデータに基づき建物の損傷・劣化を精度よく推定でき、その結果を基に状況に応じて迅速に対処できるため、建物の維持管理に適している。歴史的建造物は古くなっており、既に様々な部位に経年劣化の影響を受けている。そのような劣化に気づかずに、時間の経過とともにさらに悪化が進行する可能性がある。従来の目視点検や非破壊試験 (NDT: Non-Destructive Testing) 法を使用して欠陥が検出される頃には、重要な史的建造物にとって大きな欠陥となり修復不可能になる、また損傷発見が遅すぎたため、修復に時間やコストがかかる場合がある。

重要な歴史的建造物の健全性を平時から継続的にモニタリングすることで、安全性、修復性など大地震や経年劣化による損傷や欠陥などを早期に発見することが可能となる。これにより、深刻な影響が発生する前に耐震補強や修復などの対応を可能にする。MEMSセンサによるデータ収集の概要を図7、旧呉鎮守府庁舎のセンサ設置位置を図8、旧呉海軍軍需部需品庫のセンサ設置位置を図9にそれぞれ示す。SHMによる建物健全性評価及び維持管理システムイメージを図10に示す。

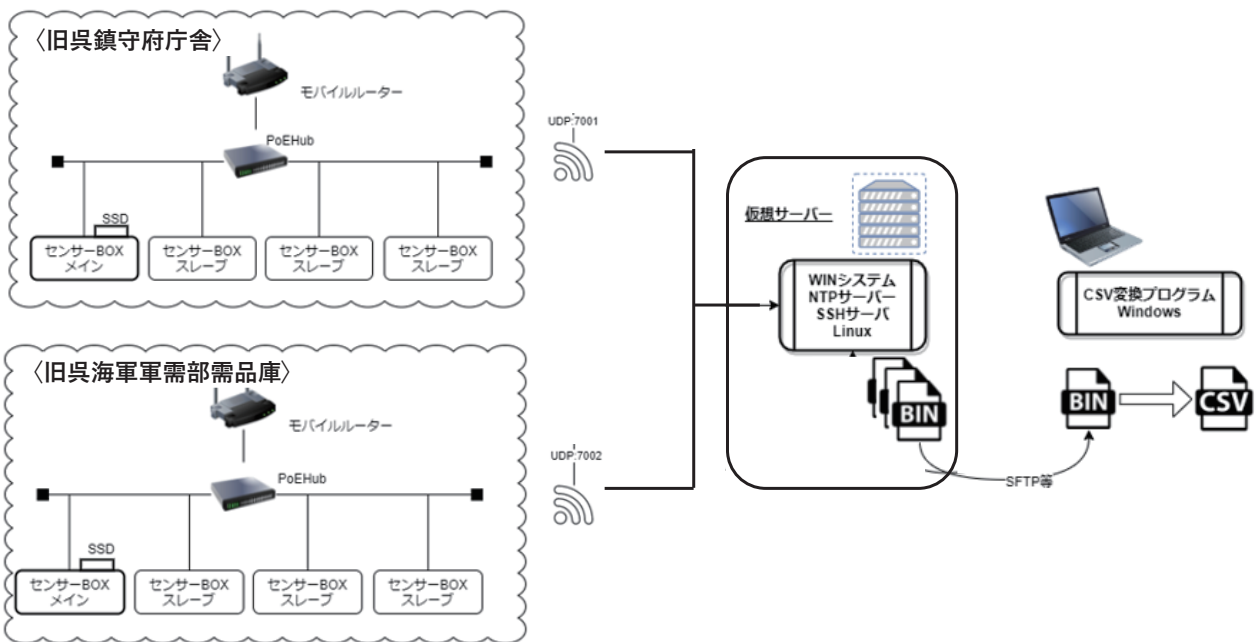


図7 MEMS センサによるデータ収集の概要

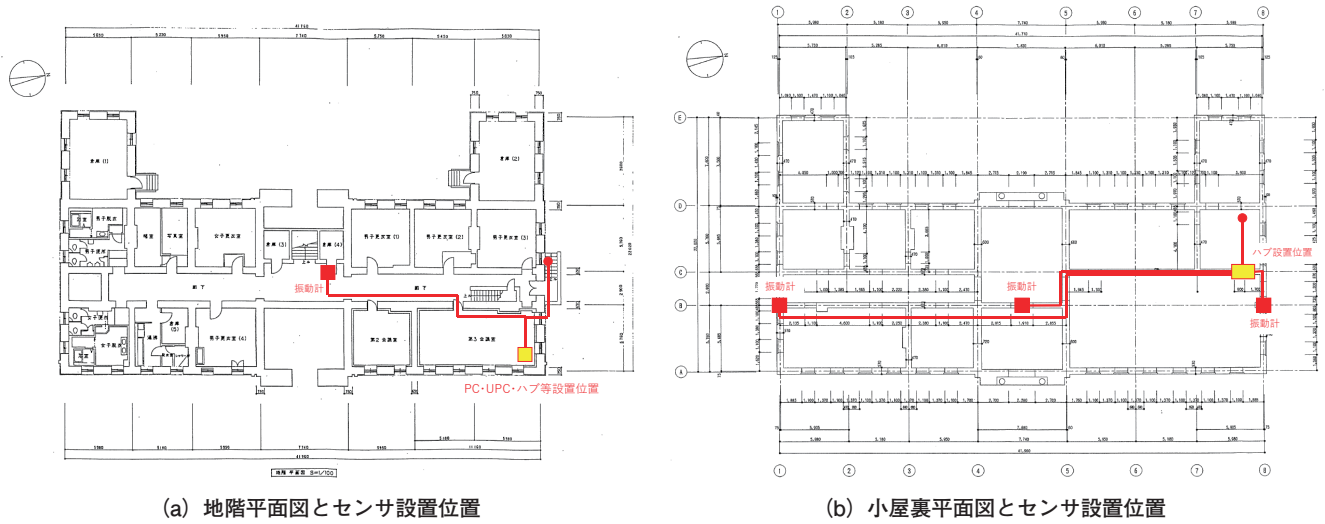


図8 旧呉鎮守府庁舎

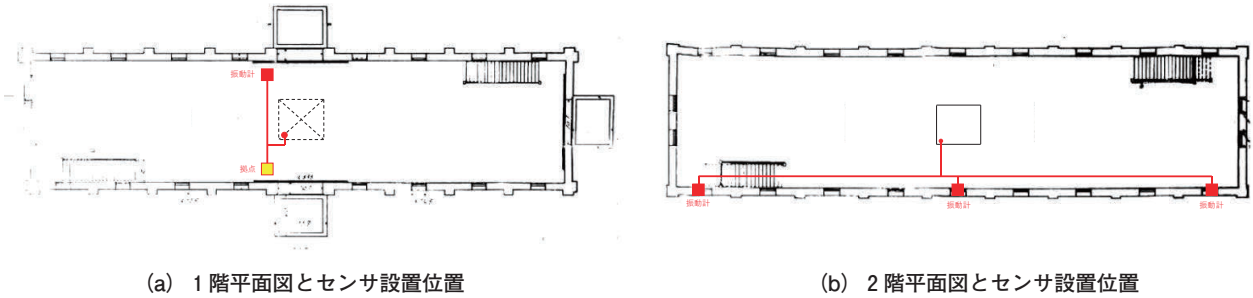


図9 旧呉海軍軍需部需品庫

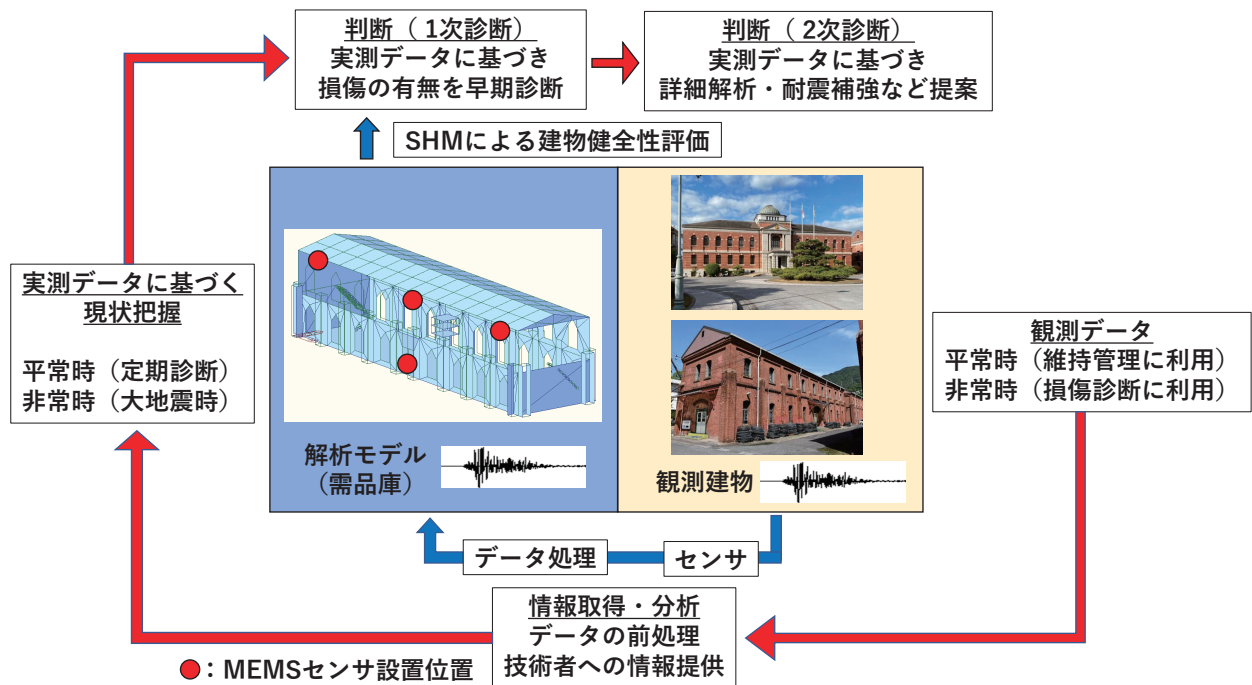


図10 SHMによる建物健全性評価および維持管理システムのイメージ

## 5. まとめ

歴史的建造物の建物健全性評価診断を目的とし、導入を計画している構造ヘルスマニタリングシステム構築のため、事前調査として実施した常時微動測定より、得られた知見を以下に示す。

- (1) 旧呉鎮守府庁舎は、高い振動数でのみピークが見られ、卓越したピークはY方向のみに見られた。このことから、旧呉鎮守府庁舎は建物の剛性が高く、耐震性に優れた建物であることが確認できた。
- (2) 旧呉海軍軍需部需品庫は、X、Y方向ともに低い振動数で卓越したピークが見られ、旧呉鎮守府庁舎に比べ明確な固有振動数が表れた。またY方向では、壁面外の複雑な挙動が含まれた卓越固有振動数が確認できた。
- (3) 各次固有振動数へのフィッティングによる減衰定数を求めた結果、旧呉海軍軍需部需品庫におけるY方向の減衰定数は、高次モードほど小さくなる傾向を確認した。

今回の常時微動測定より初期の建物振動特性を把握することが出来たことから、今後の建物健全性モニタリングシステム構築への重要な基礎資料として利用できると考えている。

今後、これらを基にモニタリングシステム設置後、対象建物の振動データ等を蓄積し、地震時の即時損傷判断や維持管理の基準データを構築し、補修・改修における評価基準の設定を検討予定である。

## 謝辞

常時微動測定にあたり、海上自衛隊呉地方総監部、渡壁研究室、光井研究室にご協力頂いた。また、戸田建設株式会社様には、測定機材を貸して頂いた。建物健全性モニタリングシステムの構築には、中外テクノス株式会社にご協力を頂いた。波形解析には、国立研究開発法人建築研究所のViewWaveソフトを使用させて頂いた。ここに記して感謝の意を表す。最後に、在学当時、測定記録分析などを整理し卒論としてまとめた丸山海都氏（現西松建設株式会社）に深く感謝する。

## 参考文献

- 1) 光井周平, 岩井哲: 宮島町家の構造特性に関する研究—調査対象建物の概要と耐震診断結果—, 日本建築学会中国支部研究報告集44巻, pp.233-236, 2021. 3
- 2) 難波宗功, 光井周平, 上寺哲也: 旧呉鎮守府の赤レンガ倉庫群の建設年代と現在までの変遷, 日本建築学会中国支部研究報告集43巻, pp.875-878, 2022. 3
- 3) 丸山海都, 渡壁守正, 渡壁尚仁, 光井周平, 山下航平: 常時微動測定に基づく歴史的建造物の振動特性評価, 日本建築学会中国支部研究報告集45巻, pp. 1-4, 2022. 3
- 4) 小川修一, 三田章: “構造ヘルスマニタリングの実用化に関する研究”. 日本地震工学会論文集, 2009, vol. 9, no. 5, p. 1-15.