

軍艦島 3号棟における気象及び振動モニタリング

Meteorological and Vibration Monitoring at Building No.3 in Battle-ship Island

○倉田 成人^{*1} 佐々木謙二^{*2}
Narito Kurata^{*1} Kenji Sasaki^{*2}

*1 筑波技術大学産業技術学部 教授 博士(工学)

Professor, Faculty of Industrial Technology, Tsukuba University of Technology, Ph.D.

*2 長崎大学工学部 准教授 博士(工学)

Associate Professor, School of Engineering, Nagasaki University, Ph.D.

キーワード：気象モニタリング；振動モニタリング；センシング；構造ヘルスマニタリング；加速度

Keywords: meteorological monitoring; vibration monitoring; sensing; structural health monitoring; acceleration.

1. はじめに

本論文では、2015年に世界文化遺産に登録された日本南部の長崎市端島に建設された建造物を対象として、振動計測と気象観測を実施し、動特性を分析した結果を示す。端島は、多くの建築建造物が林立する外観が軍艦に似ていることから「軍艦島」と呼ばれている。その軍艦に似た外観の形成に最も貢献している建造物が「3号棟」である。この3号棟に、加速度計と気象センサを設置し、長期計測を行っている。5か月間の振動データと、気象データについて報告する。

2. 軍艦島のシンボルとしての3号棟

図1に示す軍艦島の3号棟は、1959年に建設された4階建て鉄筋コンクリート造の集合住宅である。軍艦島で最も高地にあり、同島の軍艦に似たシルエットを特徴づけるシンボリックな建物である。この建物は、軍艦島内では建設年代が新しいこともあり、比較的劣化や損傷が少ない状態である。その屋上には、対岸にある軍艦島資料館と海上無線通信を行うためのアンテナ、ソーラーパネル、蓄電池、及び周囲の映像を撮影するカメラを設置してあり、軍艦島に設置したモニタリングシステムの通信拠点としている。

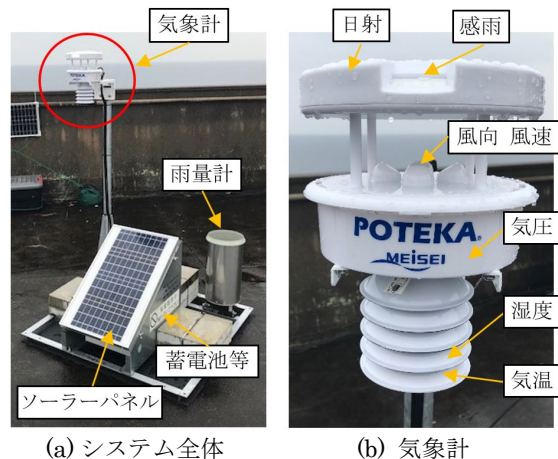
3. 自律型気象センサシステム

3号棟屋上に、自律型気象センサシステム（明星電気製、POTEKA）を設置した（図2参照）。同システムは、図2(a)に示すように、ソーラーパネル、蓄電池、無線通信部、気象計、雨量計、固定用ベースから構成されている。気象計には、図2(b)に示す7種類のセンサ（気温、気圧、湿度、日射、風向、風速、感雨）が搭載されている。観測データは1分ごとに更新されるため、実際の気象状況の変化をリアルタイムで把握することが可能であ

る。携帯電話網を利用し、観測した気象データをリアルタイムでサーバへ送信する。表1に気象センサシステムの仕様、表2に気象センサの仕様を示す。



図1 軍艦島3号棟と建築建造物の配置



(a) システム全体 (b) 気象計

図2 自律型気象センサシステム

表 1 システム仕様

観測要素	気温、気圧、湿度、日射、風向、風速、感雨、雨量
サンプリング周期	1 秒
統計間隔 (出力値)	1 分平均値
通信間隔	60 秒 (10~999 秒で可変)
データ保存	14 日分
太陽電池容量	30 W
蓄電池容量	18 Ah
内蔵電池	ニッケル水素電池 700mAh
停電補償時間	6 時間以上
動作温度範囲	-10 °C ~ +60 °C
耐風速	平均風速 60m/s
通信回線	3G 回線

表 2 気象センサ仕様

要素	測定方式	観測範囲	精度
気温	白金抵抗体	-50.0~+50.0°C	±0.3°C
湿度	静電容量式	0.0~100.0%RH	±5%
気圧	静電容量式	870.0~1050.0hPa	±0.7hPa
風向	超音波	0~360°	±10°
風速	超音波	0.0~30.0m/s	±0.3m/s(0~10m/s) ±5%(10~30m/s)
日射	フォトダイオード	0~1400W/m ²	±10%
感雨	静電容量式	0/1	—
雨量	転倒ます式	200mm/h 以下	±0.5mm

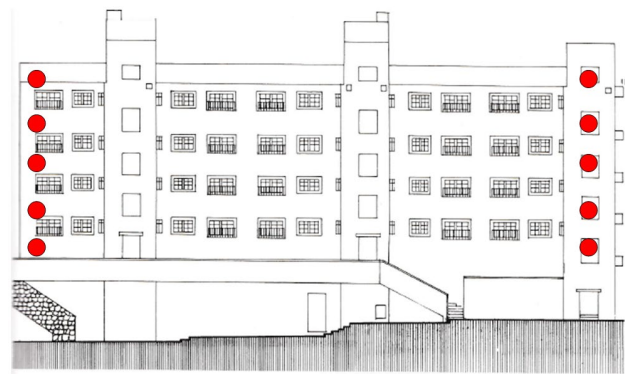
4. 振動計測システム

3号棟内の加速度計の設置場所を図3に示す。3号棟は長方形の平面であり、各階の両側に、合計10台の加速度センサを設置した。加速度センサの仕様を表3に示す。加速度計は、日本航空電子工業製JA-70SAを使用した。この加速度計は、常時微動から台風時、大地震時の振動までが計測可能である。振動計測には、16CHのAD変換モジュールを有するデータ収録装置(DAQ)を使用し、前段のマルチプレクサにより5μsec以内に同期する。時刻同期はGPSにより行い、サンプリング周波数は100Hzとした。2時間ごとに10分間の計測データを保存する常時計測機能と、台風や地震により一定以上の振動が生じたときに、計測データを保存するトリガー機能を実装した。建造物の屋上に太陽光パネルと蓄電池を設置して、振動計測システムを稼働するための電源を確保している。消費電力が大きい機器はPC、DAQ、加速度計であるが、遠隔からの常時監視と連続計測を維持するために、システムの消費電力を効率的に使用している。

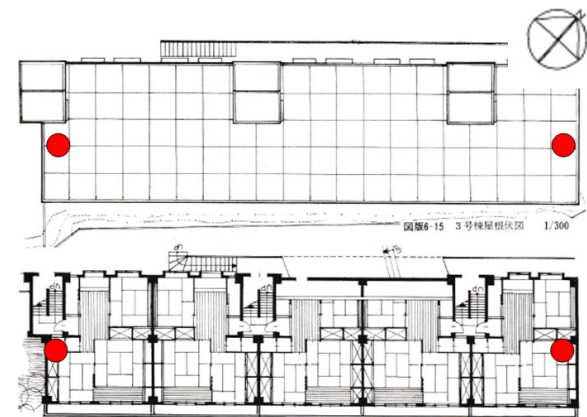
5. 気象・振動モニタリングの結果

2019年6月1日より10月18日に、各日12:00から10分間計測された加速度データから算出した、屋上階と1階の加速度フーリエスペクトル比を、図4、5に示す。各図において、計測日・振動数・フーリエスペクトル比を3次元及び2次元で表示した。さらに、計測期間中に3号棟に大きな振動をもたらした3つの台風の発生日を示した。なお、各図からわかるように、計測期間中の8月12日から19日、及び、8月27日から28日のデータの一部分が欠損している。

● 加速度センサ



(a) 立面図



(b) 屋上平面図

図3 3号棟における加速度センサ配置

表3 加速度センサ仕様

項目	観測範囲	精度
計測範囲	±m/s ² [±G]	X,Y 軸: ±19.6 Z 軸: -9.8 ~ +29.4
電圧感度	V/(m/s ²) [V/G]	0.2039±5% [2.000±5%]
零点不平衡	m/s ² [mG]	X,Y 軸: within ±0.98 Z 軸: 9.81±0.98
直線性	%FS	±2 以内
自己ノイズ (@1-30 Hz)	(m/s ²) rms/√Hz [Grms/√Hz]	9.8x10 ⁻⁶ [1x10 ⁻⁶]
周波数応答	Hz(±3dB)	≥200 以内
電圧感度: 温度係数	ppm/°C	±200
零点不平衡: 温度係数	μ(m/s ²)/°C [μG/°C]	±1961 [±200]

図4は、3号棟屋上の南側に設置したセンサの長辺方向成分の分析結果を示している。同図より、強風時、台風時には、6Hz付近に1次固有振動数が明確に表れていることがわかる。また、17Hz近傍にも高次モードの固有振動数が確認できる。さらに、強風や台風により建物の振動が大きくなると、10Hz以上の高振動数領域の振動が大きくなる。

図5は、3号棟屋上の南側に設置したセンサの短辺方向成分の分析結果を示している。同図より、強風時、台風時には、6Hz付近の他、9Hz近傍、及び、14Hz近傍に

固有振動数が表れていることがわかる。また、強風や台風により建物の振動が大きくなると、10Hz以上の高振動数領域の振動が大きくなる。

2019年6月1日より10月18日に計測された、10分間ごとの平均気温と瞬間最大風速を図6に示す。同図には、計測期間中に3号棟に大きな振動をもたらした3つの台風の発生日を示した。台風により風速が大きくなると、建物の振動が大きくなるが、3号棟では、固有振動数以外の振動が励起される。一例として、台風5号時に計測された加速度データから算出した、建物南側の屋上階と

1階の短辺方向・加速度フーリエスペクトル比を、図7に示す。同図には、台風5号が近づき、通り過ぎるまでの、7月19日12:00から21日12:00までの48時間について、2時間おきの10分間に計測されたデータの分析結果が示されている。また、同図中には、風速が大きい時間帯を赤枠で明示した。台風により風速が大きくなるにつれて、建物の振動が大きくなるが、建物の南側では10Hz以上の高振動数領域の振動が励起されることがわかる。

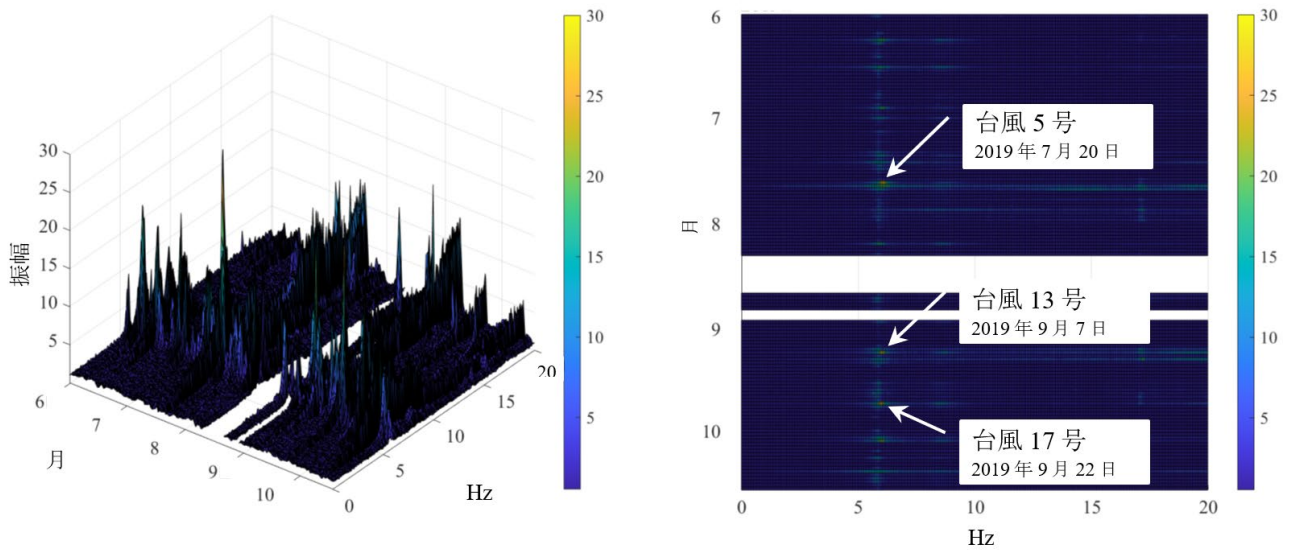


図4 フーリエスペクトル比（長辺方向・南側）

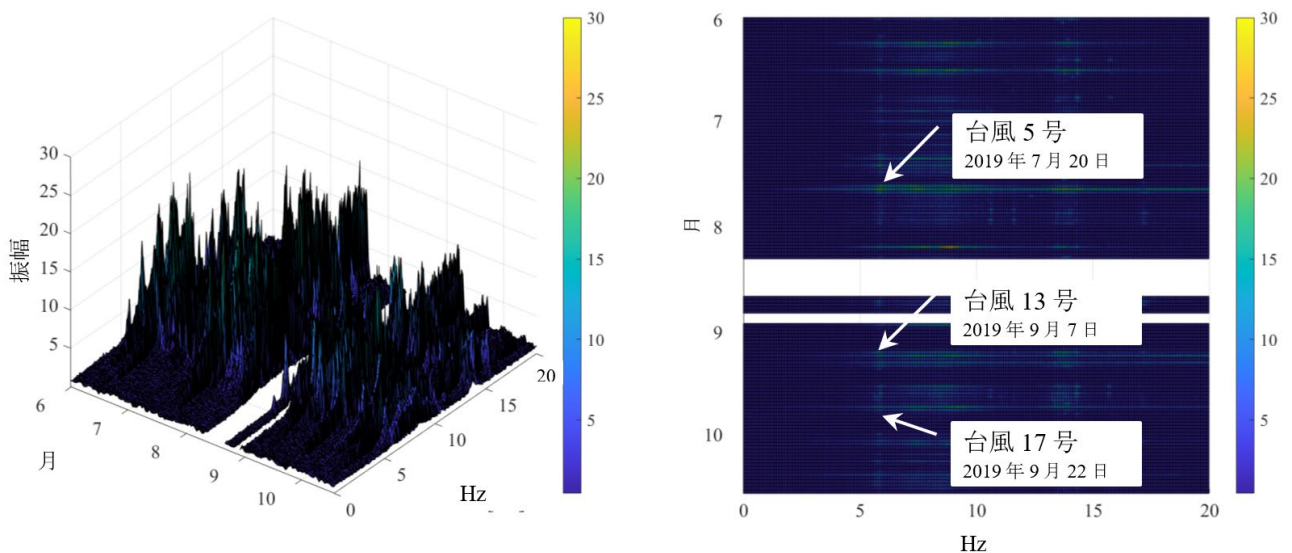


図5 フーリエスペクトル比（短辺方向・南側）

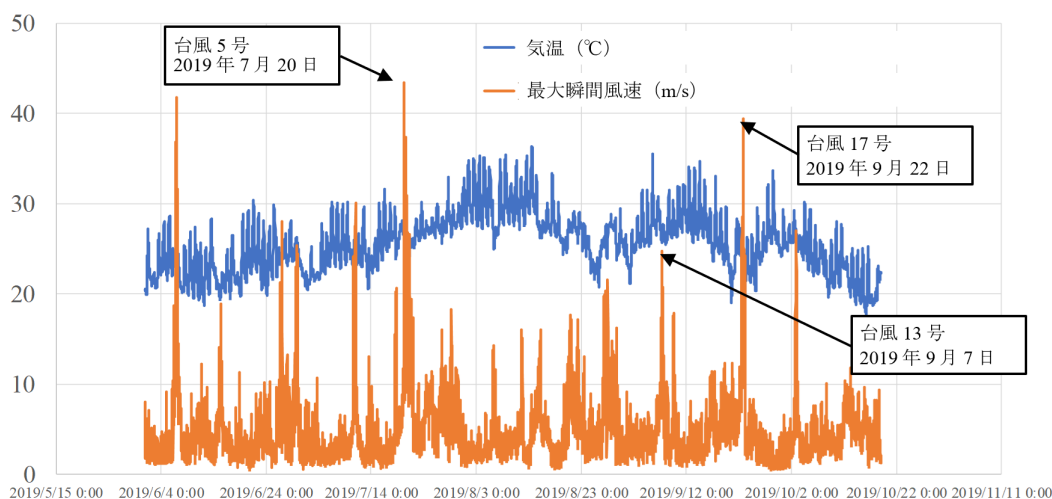


図6 平均気温と最大瞬間風速

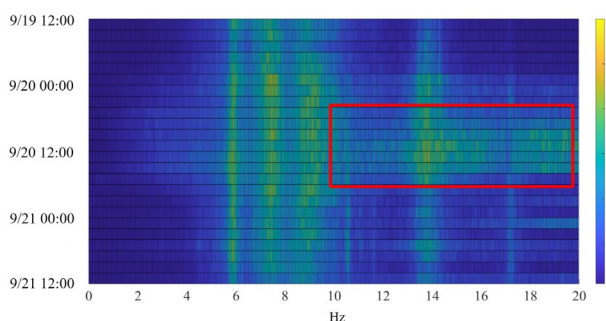


図7 フーリエスペクトル比 (短辺方向・南側)

4. まとめ

本論文では、世界文化遺産に登録された軍艦島の構造物を対象として、気象と振動のモニタリングを実施し、動特性を分析した結果を示した。対象とした3号棟では、春から秋の気温の変化による低次モードの動特性の変動は確認されなかった。強風や台風により建物の振動が大きくなると、北側に比べて南側の振動が大きくなり、高振動数領域の振動も大きくなることが確認された。これらにより、強風、台風、地震等により大きな振動が生じた後に、低次固有振動数の変動、及び風速と南側の高振動数領域の振動の変動を確認することで、建物の構造安全性の低下を検知することができる可能性が示された。

ただし、計測システムについては課題があり、例えば、軍艦島では安定した電源が得られず、太陽光発電に頼らなければならない事情から、振動モニタリングにおいて長期間のデータ欠損が生じた。また、気象モニタリングにおいても、この計測期間中に風向計の故障が生じ、正しい計測値が得られなかった。今回は、データが正常に取得できた期間に行われた気象モニタリングとして気温と最大瞬間風速、振動モニタリングとしての加速度の関係性を分析したが、今後は、さらに風向や降雨量などの他の計測値も含めて分析を行う必要がある。また、軍艦島

に最も近い気象庁の観測点であった野母崎の観測点は、2021年1月19日に観測を終了しているため、現在では本研究による観測以外に、軍艦島の気象環境を把握する手段は無く、その重要性が増している。3号棟を対象とした気象と振動のモニタリングを継続し、冬を含む年単位での計測結果を分析していく予定である。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP17KT0042 の助成を受けた。島内での機器設置と計測には長崎市の協力を得た。写真は長崎市の特別な許可を得て撮影した。

[参考文献]

- 1) World Heritage Committee. Decisions adopted by the World Heritage Committee at its 39th session (Bonn, 2015). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, (2015).
- 2) Hamamoto, T., Kurata, N., Saruwatari, S., Kawamoto, K., Tomioka, A. and Daigo, T. Field Test of Change Detection System of Building Group in Preparation for Unexpected Events in GUNKANJIMA. AIJ J. Technol. Des. (2018) 24 (57):553-558.
- 3) Boller, C., Chang, F-K. and Fujino, Y. (EDS): Encyclopedia of Structural Health Monitoring, John Wiley & Sons, 2009.
- 4) Akui, Y. and Shiga, H. Gunkanjima Survey Data Collection (Supplementary Edition), Tokyo Denki University Press, 2005.
- 5) Tomioka, A., Hamamoto, T., Kurata, N. and Saruwatri, S. Gunkanjima Monitoring Project Part 10: Configuration of MEMS Accelerometer Network. Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan (2018), pp. 151-152.
- 6) Kurata, N., Sasaki, K., Saruwatari, S., Hamamoto, T. and Tomioka, A. Gunkanjima Monitoring Project Part 11: Autonomous Weather Sensor System installed at the No.3 Building. Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan (2018), pp. 83-84.