

# 軍艦島モニタリングシステムの実装とその運用

岡田 隆三<sup>1,a)</sup> 黒木 琴海<sup>1</sup> 倉田 成人<sup>2,b)</sup> 濱本 卓司<sup>3,c)</sup> 富岡 昭浩<sup>4,d)</sup> 大胡 拓矢<sup>4</sup> 田村 博規<sup>4</sup>  
河本 満<sup>5,e)</sup> 大島 純<sup>1</sup> 渡辺 尚<sup>6</sup> 猿渡 俊介<sup>6,f)</sup>

**概要:** 筆者らは、軍艦島における崩壊中の建築構造物の映像、加速度、音のデータを収集することで、建築構造分野に貢献することを目指している。本稿では、崩壊中の無人都市である軍艦島において、筆者らが2014年から構築してきた軍艦島モニタリングシステムの実装と、この3年間の運用実績について述べる。電力やネットワークなどのインフラが存在しない軍艦島において、この3年間、様々な問題に直面しながらシステムを拡張し続けてきた。現在では映像センサ4台、加速度センサ44台、音センサ38台を用いて軍艦島の3号棟、30号棟、31号棟、65号棟、70号棟、日給社宅をモニタリングしている。2017年7月の時点において、2.7TBのデータを取得できている。軍艦島モニタリングで取得したデータは、構造解析や軍艦島資料館の公開など研究用途や観光用途で利用している。

**キーワード:** 軍艦島モニタリング、センサネットワーク、システム運用

## 1. はじめに

半導体技術の進歩で実現された廉価な超小型センサを有線・無線ネットワークで接続して物理空間をモニタリングする研究は、分野を問わず国内・国外で活発に行われている。建築構造の分野においても、安全性や居住性を評価するために、取得したセンサデータにシステム同定やデータマイニングなどを適用して損傷検出やヘルスマニタリングを行う基礎的な研究段階が成熟期を迎えている [1-5]。今や実建物を対象とした実用化段階への移行が始まっており、想定している範囲内での損傷検知やヘルスマニタリングは可能である。

ありとあらゆる建築構造物にセンサが張り巡らされた後に期待されるのは災害時の崩壊現象の迅速な検出、究極的には事前の予測である。例えば、災害時にどの建物があとどのくらいで崩壊するかなどの情報を避難者や救助活動者が取得することができれば、避難計画や救助計画を安全に遂行することが可能となる。

しかしながら、2017年7月現在時点では、実際の建築構造物においてどのような過程で建築構造物が崩壊するかなどの実データはほとんど存在しない。建築構造物の崩壊現象自体が極めて稀な現象であり、崩壊した建物に現時点でセンサが張り巡らされている可能性はゼロに近いからである。また、実際の建

築構造物において崩壊時のデータを取得しようとする、人命が危険にさらされる可能性があり、データを取得することができない。現在はシミュレーションを用いて人為的に崩壊現象を発生させているが [6]、経年劣化などによる複雑な崩壊現象までは網羅できていない。

このような問題に対する解決策の1つとして、本稿では、軍艦島で崩壊現象のビッグデータを収集する軍艦島モニタリングシステムについて述べる。軍艦島は、今まさに建築構造物の崩壊が進んでいる環境であり、経年劣化などによる建築構造物の複雑な崩壊現象のデータが取得できる。軍艦島モニタリングシステムでは、軍艦島において崩壊中の建築構造物の映像、音、加速度のデータを収集する。軍艦島でデータを取得することで、建築構造物が経年劣化で朽ちていく過程のデータや、理想的には実際に崩壊する瞬間のデータを取得することができる。

本稿の構成は以下の通りである。2節で、軍艦島で構造物をモニタリングするための要件について述べる。3節では、現在の軍艦島モニタリングシステムについて述べる。4節では、軍艦島モニタリングシステムで取得したデータを閲覧するデータ閲覧システムについて述べる。5節では、実装したシステムの評価として消費電力や運用実績について述べる。6節では軍艦島モニタリングシステムで得られた知見に関して議論し、最後に7節でまとめとする。

## 2. 課題

軍艦島モニタリングシステムは以下の3つの課題を解決する必要がある。1つ目は、ネットワークの提供である。軍艦島モニタリングにおいて取得するデータは、映像、加速度、音である。映像は毎秒縦1280px、横960pxの解像度で取得するため、カメラ1つあたり120kbps、加速度は16bit 1000Hz サンプリングで取得しているため、加速度センサ1つあたり  $x, y, z$  の3軸で48kbps、音は16bit 48kHz サンプリングで768kbps

<sup>1</sup> 静岡大学大学院総合科学技術研究科情報学専攻

<sup>2</sup> 筑波技術大学産業技術学部産業情報学科

<sup>3</sup> 東京都市大学工学部建築学科

<sup>4</sup> 日本航空電子工業

<sup>5</sup> 産業技術総合研究所

<sup>6</sup> 大阪大学情報学研究科

a) okada@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp

b) kurata@a.tsukuba-tech.ac.jp

c) thama@tcu.ac.jp

d) tomiokaa@jae.co.jp

e) m.kawamoto@aist.go.jp

f) saru@ist.osaka-u.ac.jp

のデータ量が発生する。これらのデータを収集するための仕組みが必要となる。

2つ目は、システムを駆動するための電力の提供である。軍艦島には既設の電力インフラが存在しない。センサやネットワークを駆動するためには電力が必要であるため、何らかの方法で電力を供給する仕組みが必要となる。

3つ目は、データを利活用できる仕組みの提供である。軍艦島モニタリングシステムで取得するデータは利用目的毎に観光データと研究データに分けられる。観光データは軍艦島資料館で公開するなどといった観光客向けに利用される。研究データは研究者や開発者が構造物の損壊状況を計測するのに使用する。

### 3. 軍艦島モニタリングシステム

#### 3.1 全体像

図1に軍艦島モニタリングシステムの全体像を示す。軍艦島モニタリングシステムは、軍艦島に配備したシステムとクラウドに存在するサーバで構成されている。軍艦島に配備したシステムとデータ共有サーバは、固定回線網とLTEを介して通信が行われる。軍艦島モニタリングに関わる開発者や研究者、一般ユーザは、軍艦島で取得している映像や加速度などの生データや軍艦島に配備したシステムの稼働状況を、データ共有サーバを介して閲覧する。収集したモニタリングデータは、遠隔地に配備されたバックアップサーバに定期的にバックアップを行っている。

図2に軍艦島内の基地局を設置している建物とモニタリング対象の建物を示す。3号棟は島内で最も高い場所にあるため、軍艦島モニタリングの中心となる基地局を設置している。3号棟には映像センサ3台を設置して軍艦島全体を捉えている。

モニタリング対象の建物は、70号棟、31号棟、30号棟、65号棟、日給社宅(16号棟、17号棟、18号棟、19号棟、20号棟)である。各建物には常時微動を計測する加速度センサ、建物の異常音を取得するマイクロフォンを設置している。加速度センサとしては、日本航空電子工業の高精度MEMS 3軸加速度センサ [7] を用いている。2017年7月現在では70号棟、65号棟、31号棟、30号棟、日給社宅に合計で44台の加速度センサを設置している。30号棟南には30号棟を捉えている映像センサを1台、中ノ島には軍艦島を島外から捉えている映像センサを1台設置している。

#### 3.2 3号棟: 映像センサ

図3に3号棟のモニタリングシステムの構成を示す [9]。3号棟には、150 W のソーラーパネル2台、バッテリー5台、チャージコントローラ2台、DC-AC インバータ2台、本島にある軍艦島資料館にセンサデータを伝送する高速無線リピータ、映像センサ3台、スイッチングハブ2台、PoE インジェクタ2台、雷サージ防護4台、エコタイマーを設置している。ソーラーパネルは so-ra-150、チャージコントローラは Morningstar の SunSaver MPPT、バッテリーは容量 100 Ah の SEB100、高速無線リピータは使用周波数帯が 25 GHz・上り下り最大同時通信速度が 56 Mbps・通信距離が最大約 10 km である日立国際電気

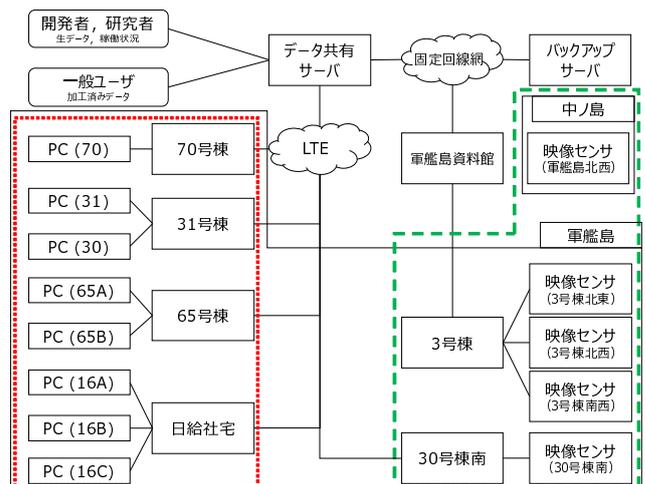


図1 軍艦島モニタリングシステムの全体像

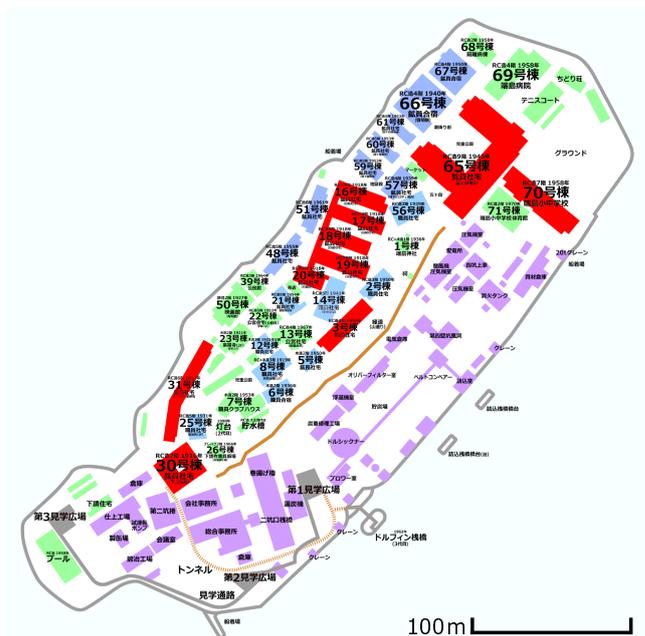


図2 軍艦島内のモニタリング対象の建物 [8]

の SINELINK 25G, 映像センサは Panasonic の BB-SW175A, スwitchingハブはコレガの CG-SW08TXRX, PoE インジェクタはバッファローの BIJ-POE-4PR, 雷サージ防護には APC の PNET1GB と SANKOSHA の LAN-P60, エコタイマーは REVEX の ET55D を用いている。

映像センサ3台は建物の大きな劣化を記録・検出するために軍艦島全域を捉えている。ソーラーパネルで得た電力はチャージコントローラを介してバッテリーに蓄電する。スイッチングハブと PoE インジェクタへの給電はバッテリーから DC-AC インバータを介して行っている。高速無線リピータと映像センサへの電力供給は PoE インジェクタを介して PoE 給電で行っている。映像は夜は取得できないため、DC-AC インバータの先にエコタイマーを接続して6時から19時の間のみ給電するように設定している。季節による日の出と日の入り時間の変化に対してはエコタイマーの設定を手動変更することで対応している。

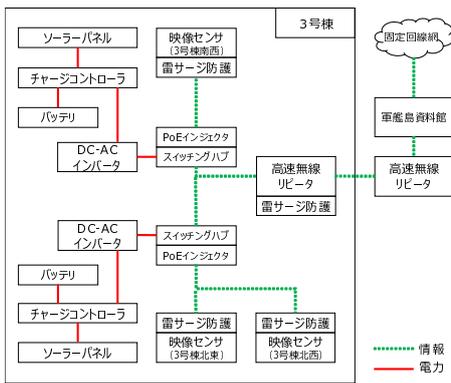


図3 3号棟のモニタリングシステム

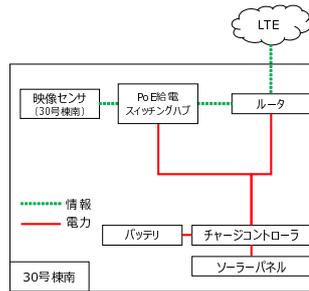


図4 30号棟南のモニタリングシステム

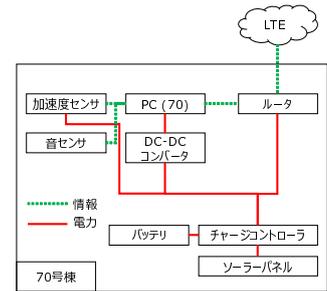


図5 70号棟のモニタリングシステム

3号棟に設置した映像センサは縦1280 px、横960 pxの画像を取得している。映像センサに割り当てられたIPアドレスに対してHTTPでアクセスすることで画像を取得できる。軍艦島資料館に設置したPCにおいて、crontabを利用して定期的にプログラムを動作させることで1秒毎と1分毎の2種類の画像を取得している。

1分毎の画像データは研究者や開発者が概観をチェックするために取得している。データ共有サーバ上で動作するウェブインタフェースで閲覧できるように設計した。軍艦島資料館に設置したサーバで画像を取得した後に、データ共有サーバに対してHTTPを介して送信している。アップロードに使用するプログラムはサーバ、クライアントともにPHPで実装している。1日の画像は撮影の行われない夜の時間帯に軍艦島資料館のサーバにおいてタイムラプス映像に変換された後、HTTPを介してデータ共有サーバに送信・公開される。

1秒毎の画像データは研究者・関係者向けと観光者向けの2つで利用している。研究者・開発者向けでは、前述した1分毎のデータを閲覧して崩壊等の現象を観測した後、1秒毎のデータで詳細に現象を解析する。観光者向けとしては、軍艦島資料館においてリアルタイム映像を配信している。

### 3.3 30号棟南: 映像センサ

図4に30号棟の自律モニタリングシステムの構成を示す[9,10]。30号棟の自律モニタリングシステムでは、200 Wのソーラーパネル、バッテリー、充電コントローラ、映像センサ、ルータ、PoE給電スイッチングハブ、エコタイマーを設置している。ソーラーパネルで得た電力は充電コントローラを介してバッテリーに蓄電する。スイッチングハブへの給電は、バッテリーからインバータを介して行っている。映像センサへの電力供給はPoE給電を用いている。30号棟の自律モニタリングシステム付近に設置した映像センサでは縦1280 px、横960 pxの画像を1秒毎に撮影している。撮影方法は3号棟に設置した映像センサと同様にHTTPでアクセスすることで取得できる。データ共有サーバにおいて、crontabを利用して定期的にプログラムを動作させることによって1秒毎の撮影を実現している。

### 3.4 中之島: 映像センサ

軍艦島から見て北西方向の海上にある中ノ島の中腹に映像センサを設置している[9]。映像センサにはBrinnoのBCC100を用いている。映像センサの電源には単3形乾電池4本を利用している。中ノ島の映像センサでは縦1280 px、横720 pxの画像を1分毎に撮影している。撮影時間は日中のみと設定している。1分毎の撮影と撮影時間は映像センサの機能を利用して行っている。この映像センサで取得したデータは転送を行わず、定期的の中ノ島に上陸して電源の交換とデータ収集を行っている。

### 3.5 70号棟: 加速度・音センサ

図5に70号棟のモニタリングシステムの構成を示す[11,12]。70号棟には、100 Wソーラーパネル、充電コントローラ、バッテリー、計測用PC、ルータ、スイッチングハブ、加速度センサ5台、音センサ、DAQ、GPSモジュール、DC-DCコンバータを設置している。ソーラーパネルはso-ra-100、充電コントローラはTracer-2215BN、バッテリーは容量80 AhのM24MF、計測用PCはオペレーティングシステムとしてWindows 8.1を搭載したLIVA-C0-2G-64G-W-OS、ルータはLTE対応のSIMを装着したぶらっとホームのOpenBlocks IoT EX1、加速度センサは日本航空電子工業のJA-70SA、音センサはサンワサプライのMM-MC23、DAQはNational InstrumentsのUSB-6218、GPSモジュールにはMikroElektronikaのMIKROE-1032を用いている。ソーラーパネルで得た電力は充電コントローラを介してバッテリーに蓄電する。ルータ、加速度センサへの電力供給はバッテリーから行う。計測用PCは入力電圧が5 Vであるため、計測用PCへの電力供給はバッテリーからDC-DCコンバータを介して行う。計測用PCとルータはEthernetで接続されている。

70号棟に設置しているPCには、DAQを介して加速度センサが、マイク入力端子に音センサが、USB接続によりGPSモジュールが接続されている。2時間毎に2分間計測用PCが起動して計測を行う。Webサーバへ、HTTP通信のPOSTメソッドを利用してアップロードしている。アップロードに使用するプログラムは、サーバ側をPHP、クライアント側をC言語で実装している。計測用PCにはリモートアクセス用のプログラムが動作しており、遠隔操作によって計測間隔や計測時間を変

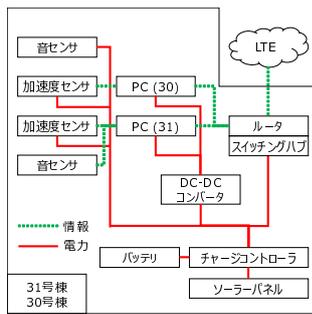


図 6 31号棟, 30号棟のモニタリングシステム

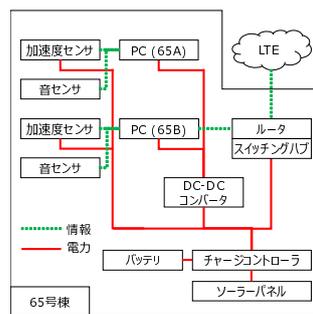


図 7 65号棟のモニタリングシステム

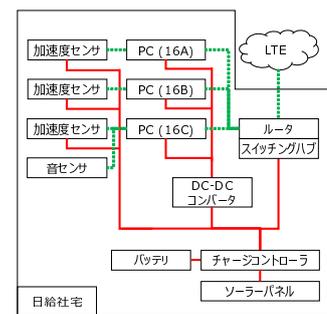


図 8 日給社宅のモニタリングシステム

更することができる。

### 3.6 31号棟・30号棟: 加速度・音センサ

図6に31号棟と30号棟のモニタリングシステムの構成を示す[12,13]. 31号棟には, 100 Wソーラーパネル, チャージコントローラ, バッテリー, 計測用PC, ルータ, 加速度センサ6台, 音センサ, DAQ 2台, GPS モジュール, DC-DCコンバータを設置している. 30号棟には, 100 Wソーラーパネル2台, チャージコントローラ, バッテリー, 計測用PC, 加速度センサ9台, マイクロフォンアレイ2台, DAQ 2台, GPS モジュール, DC-DCコンバータを設置している. 30号棟は崩壊の可能性が最も高いため, より詳細な音情報を取得できるように河本が研究開発したマイクロフォンアレイ[14]を設置している. その他の機器とソフトウェアは70号棟と同様である.

### 3.7 65号棟: 加速度センサ・音センサ

図7に65号棟のモニタリングシステムの構成を示す[12,15]. 65号棟には, 100 Wソーラーパネル2台, チャージコントローラ, バッテリー2台, 計測用PC 2台, ルータ, スwitchingハブ, 加速度センサ8台, 音センサ2台, DAQ 2台, GPS モジュール2台, DC-DCコンバータを設置している. 各機器とソフトウェアは70号棟と同様である.

### 3.8 日給社宅: 加速度センサ・音センサ

図8に日給社宅のモニタリングシステムの構成を示す[12,15]. 日給社宅には, 150 Wソーラーパネル2台, チャージコントローラ, バッテリー2台, 計測用PC 3台, ルータ, スwitchingハブ, 加速度センサ16台, 音センサ2台, DAQ 4台, GPS モジュール3台, DC-DCコンバータを設置している. 各機器とソフトウェアは70号棟と同様である.

## 4. データ閲覧システム

3節に示した軍艦島モニタリングシステムで取得したデータを研究者や関係者, 観光客向けに公開するシステムを実装した.

### 4.1 研究者・関係者向けインターフェース

管理用インターフェースは研究者や関係者が軍艦島モニタリングシステムの運用状況や取得したデータを閲覧するためのイン

タフェースである. データ共有サーバ上にPHPで実装している. 管理用インターフェースでは, 日ごとの加速度と音データ取得状況ページ, PCごとの加速度と音データ取得状況ページ, 全ての加速度と音データ取得状況ページを提供している.

図9に日ごとの加速度と音データ取得状況ページの例を示す. 日ごとの加速度と音データ取得状況ページは, 任意の日付においてどのPCで加速度データ, 音データが取得できているかを確認するために使用する. 主に建築構造の研究者が特定の日の加速度データを取得する際に利用する. 取得状況は0時から24時の1時間刻みで, 取得できた場合は緑色, 取得できていない場合は赤色で表示する. 加速度データなしは, その1日間で加速度, 音データが取得できていないことを示す. 軍艦島モニタリングシステムは全て太陽光発電でエネルギーを得ているため, 稼働状況の参考として天気概況と日照時間[h]を表示している. 気象データは気象庁ホームページ[16]より取得している.

図10にPCごとの加速度, 音データ取得状況ページの例を示す. PCごとの加速度, 音データ取得状況ページではPCごとに1ヶ月の加速度, 音データの取得状況が確認できる. モニタリングシステム管理者がシステムの稼働チェックに利用することを想定している. 取得状況は0時から24時の1時間刻みで, 取得できた場合は緑色, 取得できていない場合は赤色で表示する. 参考に気象データとして天気概況と日照時間[h]を表示している. このページは任意のPCでどのくらい連続した期間データが取得できているかの確認に使用する.

図11に全ての加速度と音データ取得状況ページの例を示す. 全ての加速度と音データ取得状況ページでは全PCにおける全期間の加速度, 音データの取得状況が確認できる. システム全体の稼働状況を把握するのに利用することを想定している. 取得状況は月ごとに1日刻みで, 取得できた場合は緑色, 取得できていない場合は赤色で表示している.

図12に1分間のタイムラプス映像生成状況ページの例を示す. このページでは映像センサごとに1ヶ月の1分間のタイムラプス映像の取得状況が確認できる. カレンダー形式で取得できた場合は○, 取得できていない場合は×を表示する. ○×は1分間のタイムラプス映像へのリンクになっている.

### 4.2 観光客向けインターフェース

観光客向けインターフェースは軍艦島資料館に来客した観光客に軍艦島モニタリングシステムで取得したデータを提供するた

加速度・音データ 日ごと



図 9 日ごとの加速度，音データ取得状況ページ

加速度・音データ PCごと

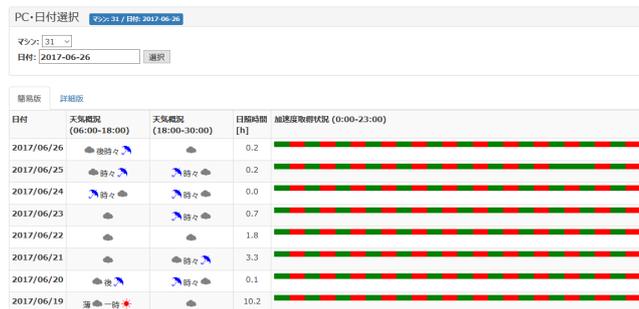


図 10 PC ごとでの加速度，音データ取得状況ページ (31 号棟の計測用 PC 31 の例)

加速度・音データ 全て



図 11 全ての加速度，音データ取得状況ページ (31 号棟の計測用 PC 31 の例)

めのインタフェースである。図 13 に軍艦島資料館で流れている映像を示す [9]。軍艦島資料館では 3 号棟に設置された 3 台の映像センサの現在の映像と前日の 1 分間タイムラプス映像を順に流している。この映像は Web ページとして PHP と JavaScript を利用して実装している。軍艦島資料館に来館した観光客がこの映像を閲覧することができる。

## 5. 評価

### 5.1 消費電力

表 1 に軍艦島モニタリングシステムで使用している機器の消費電力を示す。SINELINK 25G の最大消費電力は 12.95 W, OpenBlocks IoT EX1 の最大消費電力は 3.3 W, CG-SW08TXRX の

映像データ 1分間のタイムラプス映像

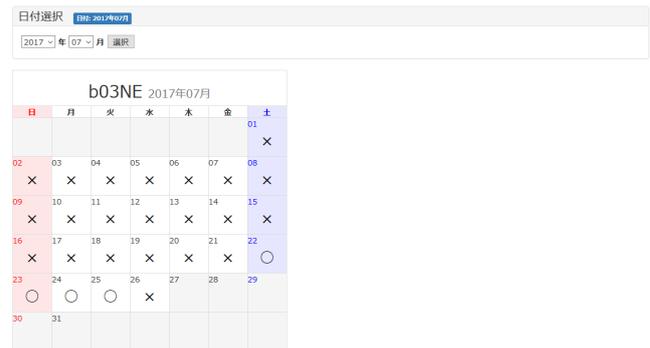


図 12 1 分間のタイムラプス映像生成状況ページ (映像センサ 3 号棟北東の例)

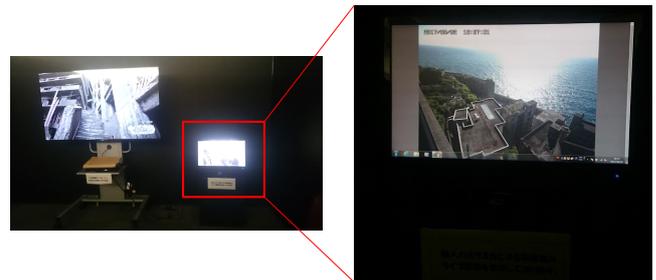


図 13 軍艦島資料館で流れている映像

表 1 機器の消費電力

機器	型番	消費電力 [W]
高速無線リピータ	SINELINK 25G	12.95
ルータ	OpenBlocks IoT EX1	3.3
スイッチングハブ	CG-SW08TXRX	5.0
PoE インジェクタ	BIJ-POE-4PR	66
映像センサ	BB-SW175A	6.2
計測用 PC	LIVA-C0-2G-64G-W-OS	14.9
加速度センサ	JA-70SA	0.17
DAQ	USB-6218	1.25
GPS モジュール	MIKROE-1032	0.33

最大消費電力は 5.0 W, BIJ-POE-4PR の最大消費電力は 66 W, BB-SW175A の最大消費電力は 6.2 W, LIVA-C0-2G-64G-W-OS の最大消費電力は 14.9 W, JA-70SA の最大消費電力は 0.17 W, USB-6218 の最大消費電力は 1.25 W, MIKROE-1032 の最大消費電力は 0.33 W となっている。

### 5.2 映像センサの運用実績

2017 年 7 月現在，軍艦島モニタリングシステムにおいて映像データは 2673 GB 取得できている。内訳は映像センサ 3 号棟北東が 424 GB, 映像センサ 3 号棟北西が 849 GB, 映像センサ 3 号棟南西が 1194 GB, 映像センサ 30 号棟南が 206 GB である。

図 14 に映像センサ 3 号棟北東の，図 15 に映像センサ 3 号棟北西の，図 16 に映像センサ 3 号棟南西の，図 17 に映像センサ 30 号棟南の画像データ取得状況を示す。縦軸が取得データ量 [GB], 横軸が日数である。日数 0 が 2015 年 2 月 24 日を意

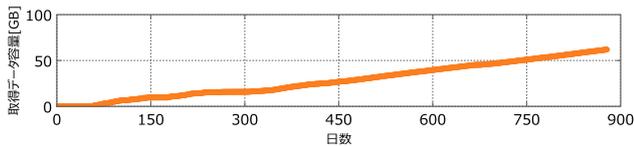


図 14 映像センサ 3 号棟北東の画像データ取得状況

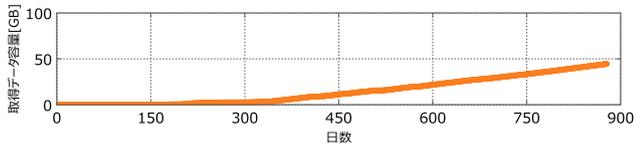


図 15 映像センサ 3 号棟北西の画像データ取得状況

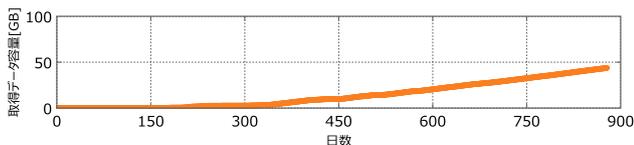


図 16 映像センサ 3 号棟南西の画像データ取得状況



図 17 映像センサ 30 号棟南の画像データ取得状況

味している。300日を過ぎたあたりで勾配が変わり、その後安定動作していることが分かる。これは2016年2月にバッテリーを増設したことに起因している。

30号棟南の映像センサでは700日付近で勾配が変化した後、800日付近でデータが取得できなくなっている。700日以前では20Wのソーラーパネルを用いていたが、発電量が足りず、安定動作していなかった。ソーラーパネルとバッテリーを大容量の物に交換することで、安定した動作が得られるようになった。800日付近からデータが取得できていないのはソフトウェア的な不具合であったのではないかと考えている。2017年8月2日に現地に調査に行った所、ハードウェア的には問題はなく、システムを全てリセットすると動作を再開した。

### 5.3 加速度センサと音センサの運用実績

2017年7月現在、軍艦島モニタリングシステムにおいて加速度データと音データは67.9GB取得できている。図18に計測用PC70の、図19に計測用PC31の、図20に計測用PC30の、図21に計測用PC65Aの、図22に計測用PC65Bの、図23に計測用PC16Aの、図24に計測用PC16Bの、図25に計測用PC16Cの加速度データ取得状況を示す。縦軸が取得データ量[GB]、横軸が日数である。日数0が2015年2月24日意味している。計測用PC31、30、65A、65Bは安定して計測が行えているが、70号棟、31号棟、30号棟、65号棟、日給社宅に関しては最大で6ヶ月ほどの期間で計測が行えていない期間がある。

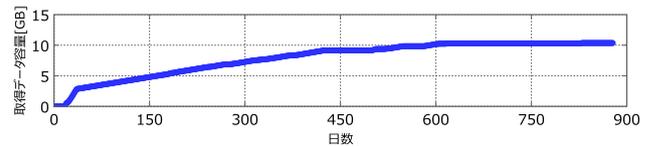


図 18 70号棟の計測用PC70の加速度データ取得状況

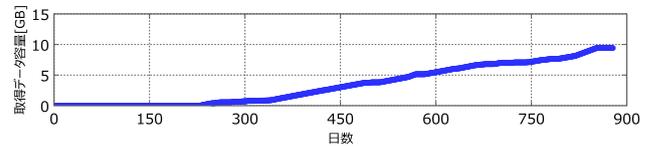


図 19 31号棟の計測用PC31の加速度データ取得状況

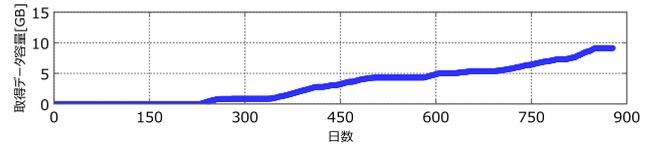


図 20 30号棟の計測用PC30の加速度データ取得状況

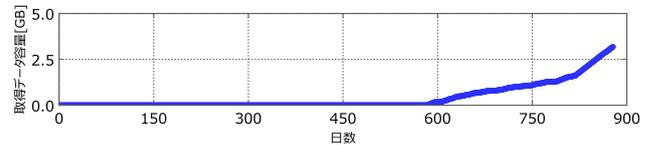


図 21 65号棟の計測用PC65Aの加速度データ取得状況

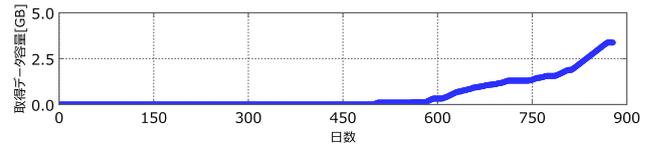


図 22 65号棟の計測用PC65Bの加速度データ取得状況

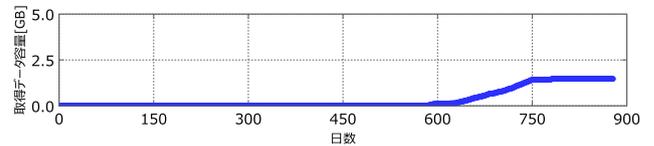


図 23 日給社宅の計測用PC16Aの加速度データ取得状況

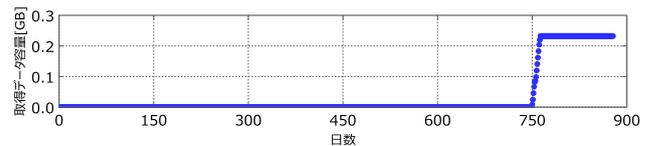


図 24 日給社宅の計測用PC16Bの加速度データ取得状況

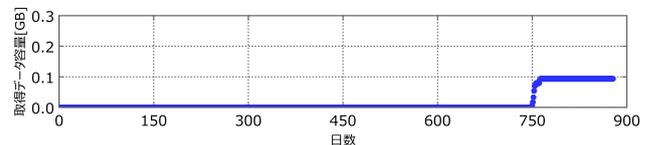


図 25 日給社宅の計測用PC16Cの加速度データ取得状況

計測できていない期間の発生は以下の2つが原因である。1つ目は、電力の問題である。軍艦島には電源が存在しないため、太陽光発電で得たエネルギーでモニタリングを行っている。得た電力はバッテリーに蓄電しているが、天候の悪い日が続くとエネルギーが尽きてしまい計測が行えなくなる。また、エネルギーを効率よく利用するため、一部の計測PCでは計測を行わない期間はスリープ状態に移行している。これらのPCが計測の



図 26 台風前の 70 号棟



図 27 台風後の 70 号棟

ため起動する際に何らかの原因で正常に起動が行えず、応答不能になってしまうことがある。この状態では遠隔でソフトウェアリポートを行うことができず、軍艦島に赴いてハードウェアリポートをする必要があるため、長期間計測が行えなくなってしまう。

2つ目は、機器の故障である。軍艦島は夏になると高温になるため、軍艦島に設置した機材は長時間高温に晒されることとなる。機材の使用温度範囲内であっても、長期間使用していると故障する場合がある。これまでに故障と考えられるシステムの停止が複数回起こり、システムの交換や回収を行っている。

#### 5.4 センサデータの解析結果

これまで得られたデータから建築構造物の様々な情報が抽出できている。3号棟で取得した映像データでは、2015年6月に台風が発生した際に屋根が崩壊していることが確認できている。図26、27に台風前後の70号棟の屋上の映像を示す。図26が台風前、図27が台風後である。図26、27を比較すると台風後には赤丸で囲まれた崩れている部分が大きくなり、緑丸で囲まれた部分が凹んでいることが分かる。その他にも、加速度センサ、音センサ、映像センサから様々な情報を抽出することに成功している [7, 9-13, 15, 17, 18]。

### 6. 議論

図28に軍艦島モニタリングシステムのプロトコルスタックを示す。図28と3節のシステム構成から分かる通り、軍艦島モニタリングシステムは多様な技術を組み合わせた複雑なシス

<b>アプリケーション</b> 計測システム, データアップローダ, タイムラプス映像生成, 観光サービス, 管理サービス
<b>ミドルウェア・プログラミング言語</b> Apache, LabVIEW, PHP, C言語
<b>通信プロトコル</b> SSH, HTTP, TeamViewer
<b>OS</b> Linux, Windows, 各ハードウェアの独自OS
<b>通信インターフェース</b> Ethernet, LTE, PoE, 高速無線リピータ, USB
<b>ハードウェア</b> mini PC, OpenBlocks, サーバ, PoE給電スイッチングハブ, スwitchングハブ, ルータ 加速度センサ, 映像センサ, 音センサ ソーラーパネル, バッテリ, チャージコントローラ エコタイマー, 雷サージ防護, DC-ACインバータ, DC-DCコンバータ

図 28 軍艦島モニタリングシステムのプロトコルスタック

テムとなっている。複雑となった要因は以下の3点である。

1つ目の要因は、計測器をツールとして扱う研究者・技術者は Windows ベースでシステムを構築する傾向にあることである。軍艦島モニタリングプロジェクト開始時の予定では、計測システムは、リモートからコマンドラインベースで作業できること、長期稼働時の安定性の観点から Linux 主体で構築したいと考えていた。しかしながら、計測システムを扱う研究者・技術者は Windows 上、特に LabVIEW を用いて計測システムを構築する傾向がある。計測機器のドライバ自体も Windows しか対応していないことが多い。結果として、計測システム側は Windows 主体で、ネットワーク側は Linux 主体で構築することとなった。

2つ目の要因は、軍艦島内では、無線ネットワーク技術が使い辛いことである。軍艦島モニタリングプロジェクト開始時の予定では、できるだけ共通の仕組みで軍艦島モニタリングシステムを構築する予定であった。具体的には、1) 各センサ拠点から3号棟に対して IEEE 802.11 あるいは IEEE 802.15.4 でデータを配送、2) 3号棟から軍艦島資料館に無線アクセスシステムで広帯域伝送の2層構造でネットワークを構築することを想定していた。しかしながら、軍艦島は建物が密集している上に中央が丘状になっている特殊な地形であるため、水平方向における完全な見通しでの通信ができる状況が少ない。見通しが得られない環境では、距離的には数十メートルであっても IEEE 802.11 や IEEE 802.15.4 では通信できない状況が多く発生した [19]。無線 LAN を部分的に用いることも検討したが、安定して動作させることはできず、最終的には3号棟は高速無線リピータ、有線で通信できるところは無理してでも Ethernet、それ以外の場所は LTE を用いることとなった。

3つ目の要因は、電力の制約である。前述した通り、当初の予定は各センシング拠点毎にソーラーパネルを具備して、各センシング拠点同士は無線で自律的なネットワークを構築することを想定していた。しかしながら、崩壊中である軍艦島ではソーラーパネルを設置する場所を見つけるのも一苦勞であり、常に理想的な場所にソーラーパネルを設置できるとは限らなかった。また、ソーラーパネルを設置するのにも膨大な労力を必要とした。例えば 200 W のソーラーパネルは約 1.6 m × 0.8 m で重さ 16 kg と大きい。さらに、バッテリーに関しても 100 Ah のも

のは 32 kg である。軍艦島への渡航は漁船で行っているが、漁船への荷積み、漁船からの荷卸しをしなければならない。瓦礫の中の運搬やエレベータの無い老朽化した建物の屋上に持つて上がる必要がある。ソーラーパネルが台風等で飛ばないようにするためにはある程度の重量も必要であるため、軽量な商品では解決できない点も障害となった。

以上の要因によって複雑化したシステムによって、問題が生じた際に問題箇所の切り分けが難しくなった。一度軍艦島に設置した後は、データがアップロードされていることでしか動作確認ができない。しかしながら、問題の原因は多様であり、遠隔から分かることは限られている。例えば、悪天候が続いてバッテリー切れを起こしてシステム全体が動作不能となったり、ソーラーパネル・アンテナ・センサがおそらく塩害の影響で故障したり、ネットワーク機器が熱暴走で故障したり、当初グローバル IP を提供していた某社の LTE 回線が何の前触れもなくプライベート IP に切り替えられたりするなど様々な要因がデータ収集の障害となった。

最も多発した問題は計測装置がスリープ状態から復帰しないことであった。軍艦島モニタリングにおいてソーラーパネルを増設するには膨大な労力が発生するため、計測装置を間欠動作させることで消費電力を節約する仕組みを導入することとした [20,21]。しかしながら、前述した Windows ベースの計測システムにおいて、スリープからの復帰に失敗する事象が多発した。スリープから復帰することに失敗すると遠隔からはリセットをすることができなかったため、結果として計測できない期間が長期化することとなった。

また、当初は軍艦島モニタリングで取得したデータをクラウドサービスで蓄積することを想定していたが、現状のクラウドサービスは膨大な量のセンサデータの蓄積には向いていないことが分かった。2017 年 7 月時点で 2.7 TB のデータが取得できている。これらのデータは今後も増え続けることが予想される。もしこれらのデータ量をクラウドサービスで蓄積すると、月当たり数万円の利用料が発生する。クラウドサービスでは蓄積したデータが数十 GB 程度であれば月当たり数千円で利用可能であるため、十倍以上のコストが発生することは予想外であった。データ蓄積に要する費用を抑えるために、現在は Linux サーバと NAS を組み合わせて大学内にバックアップシステムを構築している。

## 7. おわりに

本稿では、軍艦島モニタリングシステムの実装とその運用について述べた。現在はシステムの安定化に向けた検討をさらに進めている。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金 (26289194, 代表: 濱本卓司) と科学研究費補助金 (17KT0042, 代表: 猿渡俊介) の助成を受けたものである。本研究の遂行をサポートして下さった長崎市世界遺産推進室に感謝致します。

## 参考文献

- [1] Natke, H. G., Tomlinson, G. R. and Yao, J. T. P.: *Safety Evaluation Based on Identification Approaches*, Vieweg (1993).
- [2] Natke, H. G. and Cempel, C.: *Model-Aided Diagnosis of Mechanical Systems*, Springer (1997).
- [3] Haldar, A.: *Health Assessment of Engineered Structures*, World Scientific (2013).
- [4] 濱本卓司: 建築物の耐震性能評価のためのモニタリング技術, 計測自動制御学会 計測と制御, Vol. 46, No. 8, pp. 605-611 (2007).
- [5] 濱本卓司: 建築物の構造ヘルスマニタリング, 基礎工 特集基礎工におけるモニタリングとその活用, Vol. 43, No. 11, pp. 17-20 (2015).
- [6] 金裕錫, 壁谷澤寿海, 松森泰造, 壁谷澤寿一: E-ディフェンスによる実大 6 層鉄筋コンクリート耐震壁フレーム構造の破壊過程究明に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 641, pp. 1327-1334 (2009).
- [7] 富岡昭浩, 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その 2) 長期振動計測システム, 2016 年度日本建築学会大会 (2016).
- [8] 軍艦島モニタリングプロジェクト, <https://www-int.ist.osaka-u.ac.jp/battleship/>.
- [9] 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介, 富岡昭浩: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その 9) 視覚センシングと聴覚センシングとの融合, 2017 年度日本建築学会大会 (2017).
- [10] 倉田成人, 濱本卓司, 猿渡俊介, 富岡昭浩: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その 4) 日本最古の鉄筋コンクリート造集合住宅 30 号棟の画像モニタリング, 2016 年度日本建築学会大会 (2016).
- [11] 関根明日香, 濱本卓司, 富岡昭浩, 倉田成人, 猿渡俊介: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その 3) 長期モニタリングに基づく軍艦島 70 号棟の動的挙動に関する考察, 2016 年度日本建築学会大会 (2016).
- [12] 富岡昭浩, 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その 6) MEMS 加速度センサネットワークの構成, 2017 年度日本建築学会大会 (2017).
- [13] 関根明日香, 鶴岡湧, 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介, 富岡昭浩: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その 7) 30 号棟の振動計測と劣化調査, 2017 年度日本建築学会大会 (2017).
- [14] 河本満, 幸島明男, 車谷浩一: 音環境理解を基にした音環境模様のモニタリング技術, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J99-D, No. 10, pp. 1089-1093 (2016).
- [15] 鶴岡湧, 関根明日香, 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介, 富岡昭浩: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その 8) 日給社宅と 65 号棟の振動計測と劣化調査, 2017 年度日本建築学会大会 (2017).
- [16] 気象庁: 最新の気象データ, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/synopday/>.
- [17] 濱本卓司, 倉田成人, 猿渡俊介, 富岡昭浩: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その 1) 研究計画と予備計測/長期計測, 2015 年度日本建築学会大会 (2015).
- [18] 鶴岡湧, 崔井圭, 濱本卓司: 軍艦島モニタリングプロジェクト (その 5) ウェアラブルカメラとドローンを用いた軍艦島 30 号棟の劣化調査, 2016 年度日本建築学会大会 (2016).
- [19] 岡田隆三, 小寺志保, 富岡昭浩, 倉田成人, 濱本卓司, 猿渡俊介: 軍艦島全域センサネットワーク構築に向けた検討, 第 78 回全国大会講演論文集, Vol. 2016, No. 1, pp. 229-230 (2016).
- [20] 黒木琴海, 小寺志保, 倉田成人, 濱本卓司, 猿渡俊介: 環境発電型センサシステムのためのデータ中心型タスクスケジューリング方式, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 11, pp. 2475-2488 (2016).
- [21] Kuroki, K., Kodera, S., Kurata, N., Hamamoto, T. and Saruwatari, S.: Poster: Data-Centric Task Scheduling for Battleship Island Monitoring, *Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '15)*, ACM, pp. 417-418 (2015).