

防災および構造物の維持管理のための安価な小型 IoT センサの開発ならびに実現に向けた取り組み

大川原大智¹・井上和真²・大塚叶登³・浅見健斗⁴

Development of Low Cost Small IoT Sensors for Disaster and Structural Maintenance and Initiatives for Realization

Daichi OHKAWARA¹, Kazuma INOUE², Kanato OHTSUKA³ and Kento ASAMI⁴

Abstract

Recent social problems include the increase in maintenance work due to aging infrastructure, frequent natural disasters, problems specific to each region and shortage of engineer. In this research, we developed low-cost and small IoT sensors to solve these problems, and conducted two demonstration experiments. As the demonstration experiment in the field of disaster prevention, the water level in the confluence of rivers in Shimonita Town, Gunma Prefecture was photographed, and the information was transmitted to SNS. As the demonstration experiment in the field of maintenance management of structures, concrete surface was photographed from the under the RC slab and their applicability was examined. In both fields, the demonstration experiment conducted smoothly. As the results, the feasibility of low-cost and small IoT sensors was confirmed.

キーワード：IoT センサ，地域防災，構造ヘルスマニタリング，Raspberry Pi

Key words: IoT sensor, local disaster prevention, structural health monitoring, Raspberry Pi

1. はじめに

昨今の社会問題として，頻発する自然災害やイ

ンフラの老朽化に伴う維持管理作業の増加，少子高齢化，人口減少に伴う働き手の不足等が挙げら

¹ 群馬工業高等専門学校環境都市工学科 (現 新潟大学工学部工学科社会基盤工学プログラム)
Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Gunma College (currently, Niigata University, Faculty of Engineering, School of Engineering, Civil Engineering Program)

² 群馬工業高等専門学校環境都市工学科
Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Gunma College

³ 群馬工業高等専門学校環境都市工学科 (現 金沢大学理工学域地球社会基盤学類)
Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Gunma College (currently, Kanazawa University College of Science and Engineering Geosciences and Civil Engineering)

⁴ 群馬工業高等専門学校環境都市工学科 (現 群馬工業高等専門学校専攻科環境工学専攻)
Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Gunma College (currently, Department of Environmental Engineering, National Institute of Technology, Gunma College)

れる。これらの社会問題を受け、地震や洪水などといった自然災害の際に、離れた場所からの河川や構造物のリアルタイムモニタリング技術や、常時の維持管理が期待される。従来の構造物の維持管理では、大規模な河川橋梁においては地震計などのセンサを用いて、地震時挙動の分析が行われる。例えば、藤野ら¹⁾は、2011年東北地方太平洋沖地震における横浜ベイブリッジや、その周辺地盤における地震観測記録を活用して、地震応答の推定を行った。また、支承部の点検は目視点検や打音診断などの人による作業だけでは、維持管理が困難であるため、支承内部の点検に変位モニタリング手法の開発も行われている^{2,3)}。

すべての構造物において、前述のようなモニタリング技術が導入されることが望ましいが、地方公共団体が管理する小規模な河川橋梁を対象とした場合、人材不足や予算制約が厳しいといった要因から、従来のセンサを活用した安定かつ継続したモニタリングの実施は困難であることが予想される。その上、従来のセンサには以下のような問題がある。

- ・センサ1つの値段が高額で多地点における設置ができない。
- ・地震や豪雨などによる災害が予想される場所へのセンサの設置や、災害発生直後の構造物観測に用いる際のセンサの設置までに時間を要する。
- ・危機管理型水位計などは、水位観測のみの単体機能であるため、河川状況の写真撮影ができない。

- ・実際には必要のない機能があり高額化の要因になる（オーバースペック）。
 - ・センサの設置に際して、電源設備等の工事が必要となる。
 - ・センサの設置場所や設置目的に適した製品がない場合があり、適したものを作ると特別注文となり、高額化の要因になる。
- そこで本稿では、従来のセンサに対して以下のような特徴、目的で IoT センサの開発を行った。
- ・センサの設置場所や設置目的といった、用途に応じたカスタマイズを可能にする。
 - ・高額化により実現困難であった多地点観測の実現のため、コストを抑える。

また、これまでも IoT センサの研究や開発、実験は行われている^{2,4,5)}が、室内における設置や数時間から数日といったように短期的設置および実験が多い。IoT センサの屋外における長期的な設置には屋内における短期的な設置とは異なり、設置場所や通気性、耐熱性、防水性、防犯性など留意すべきことが多い。そこで、本稿では屋外における IoT センサの長期的設置に向けた取り組み、および、防災分野および構造物の維持管理に関する実証実験による安価な小型 IoT センサの活用実現性を報告する。従来、センサによって取得したデータ（画像、水位、加速度等）は技術者や管理者の利活用が中心であったが、地域住民向けにも取得したデータを防災情報として発信することで、地域の防災力向上が期待できる（図1）。

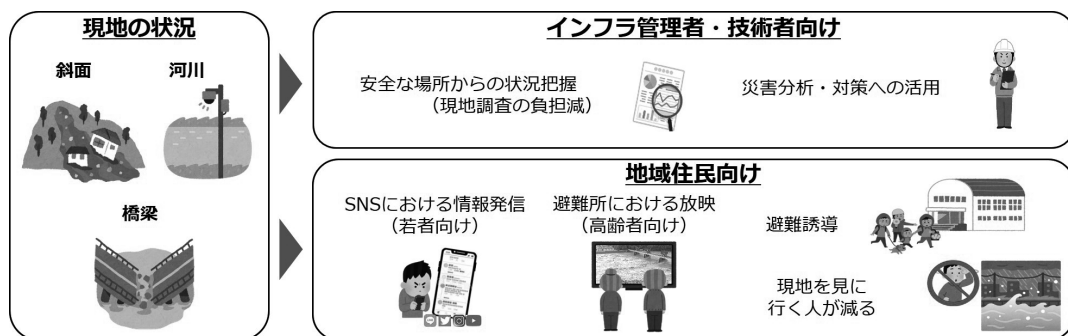


図1 IoT センサによる技術者・地域住民への防災情報発信スキームの概要図

2. IoT センサの設計

2.1 IoT センサを構成するハードウェアの概要

開発中の IoT センサを図 2 に示す。また、使用した機器を以下に示す。

- ① シングルボードコンピュータ (Raspberry Pi 4 Model B 4GB)
- ② 赤外線カメラモジュール (UNIROI 社製)
- ③ 光学式測距モジュール (LIDAR-Lite v3HP)
- ④ MEMS 加速度センサ (ADXL 355)
- ⑤ USB スティック型データ通信端末 (AK-020)

Raspberry Pi は、以下のような特徴がある。

- ・プログラミング言語 Python でプログラミングが可能で、本稿で開発する IoT センサの目的にある、用途に応じたカスタマイズが可能である。
- ・Raspberry Pi を用いた開発・研究が様々な分野で既に行われている^{2,4,5)}。
- ・世界中の技術者がインターネットに公開している情報が多い⁶⁻⁸⁾。

そこで、IoT センサの基礎となるシングルボードコンピュータにおいて Raspberry Pi を選定した。

また、各機器は以下のような役割がある。

- ① 各機器を制御、操作
- ② RC 構造物等のひび割れや河川状況を撮影
- ③ 河川水位の観測
- ④ 地震観測や RC 構造物等の傾斜検知
- ⑤ 携帯電話回線の利用

これら、すべて取り外しが可能であり、センサの使用目的に応じた設計変更が可能である。

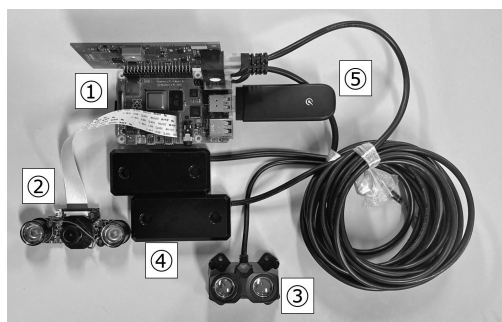


図 2 IoT センサの構成例

2.2 IoT センサを構成するソフトウェアの概要

Raspberry Pi 用の開発者向け OS である Raspberry Pi OS (ver.10.10) を使用して開発を行った。また、IoT センサにおいて、プログラミング言語はシェルスクリプトおよび Python 3.7 を使用した。

2.3 IoT センサを収納するケースの設計

IoT センサは屋外で活用するため、大雨や強風、猛暑などの厳しい環境下における設置を想定している。そのため、IoT センサを収納するケースには堅牢な構造が要求される。さらに、ケース内のセンサに湿気や高温による悪影響を及ぼさないためには、防水性、通気性、耐熱性を確保することが必要となる。そこで、防水性および強度を高めるために、ケースの材料として塩化ビニル管を用いる。塩化ビニル管は、主に水道管に使われているように厳しい環境下においても十分な強度を持ち、多種多様な大きさ・形状がある。また、塩化ビニル管は通信販売サイトやホームセンターで購入でき、入手が容易であるため、モニタリング実施中のケースに不具合があった際に、IoT センサの管理者・利用者（地方公共団体、技術者）自身で修理することが出来るといったメリットがある。

通気性・耐熱性の確保（湿気の発生、ケース内における温度上昇に対する対策）に関しては、発熱の多い Raspberry Pi に小型のファンを取り付



図 3 IoT センサを収納するケースの一例

けることや、ケースに穴を開けventフィルターを貼付することで、通気性を確保しながらケースを防水仕様にする。作製したケースの一例を図3に示す。このケースは河川橋梁への設置を想定して作製したものであり、フランジとアンカーボルトを用いることによって、支承付近のコンクリートへの固定が可能といった特徴がある。このように、設置場所、設置環境に応じて設計を変更することが可能である。

2.4 屋外利用を想定した IoT センサの電源供給

IoT センサは、従来のセンサが設置されていないような電源供給の困難な場所に設置することが想定される。そのため、そのような場所においても安定した電源供給が行えるように、独立太陽光発電システムを採用した。独立太陽光発電システムとは、太陽光パネルで発電した電気を鉛蓄電池に蓄え、IoT センサに電源を供給するシステムである。電源供給の困難な場所においても IoT センサを安定して稼働させることが可能である(図4)。しかし、日照時間や天候による太陽光パネルの発電量への影響が懸念されるため、それらを改善するために、バッテリーの容量を12V20Ah、太陽光パネルを50Wとした。今後、風力発電と太陽光発電の併用などの他の方法による発電を組み合わせる発展性もある。本稿では IoT センサの電源供給に工事が必要な場所であったが、代替として太陽光発電によって電源供給を行った。電源が確保

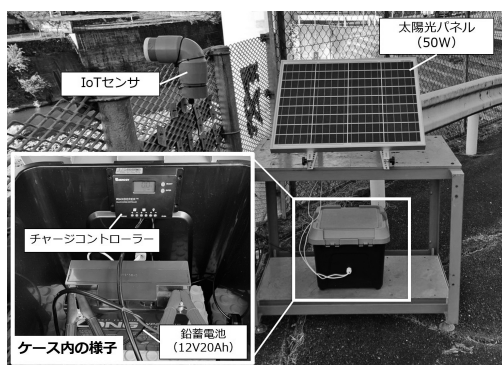


図4 IoT センサへの電源供給のための独立太陽光発電システムの構成

できる場所では必要がなく、設置環境に合わせた IoT センサの電源供給を選択可能である。

3. 防災分野における IoT センサ活用の検討

3.1 IoT センサによる防災情報の発信スキーム

地震や豪雨などの災害発生時の問題として、技術者および管理者は現地に直接点検に行かなければならないことや、危険箇所へ住民が直接見に行ってしまうことが挙げられる⁹⁻¹¹⁾。そこで、多地点に IoT センサを設置し、撮影した画像を防災情報として発信することで減災に繋がることが期待される。具体的な情報発信の方法として、スマホユーザー向けには SNS を利用した発信、非スマホユーザーの多い高齢者向けには役場や避難所といった公共施設におけるライブ映像の配信によって発信を行うことが考えられる。また、既に多くの自治体で防災向けのライブ映像の配信は行われている。しかし、高額なため設置場所に限りがあることや、配信する web サイトが複数存在し、情報発信方法が分散されているといった問題がある。そこで、本稿の IoT センサはプログラミングが可能であり、指定したサーバに送信するなど、プログラムを組み込んでおくことで、各自治体が所有する今までのライブ映像の配信システムと連携することが可能で、情報発信方法の分散を防止できる。また、既存システムのない自治体は IoT センサで取得した河川状況などのデータを、SNS を用いて発信することで、新規にシステムを構築する必要がなく、防災情報の発信が可能になる。このように各自治体の状況に応じた設置が可能であり、これまでの取り組みと違いがあり有用性がある。

次に、地域住民に対する防災情報の分かりやすさが課題として挙げられる。現在も、洪水時の水位観測に特化した低コストできめ細かな水位把握が可能な危機管理型水位計¹²⁾が存在するが、数字のみの情報である水位は地域住民に対する防災情報の分かりやすさとしては不十分であり、避難意識の向上には繋がらないことが予想される。そこで、IoT センサによって撮影する画像を用いることで、視覚的な情報として地域住民に対して情報

を発信し、前述の問題を解決することを試みる。また、将来的にはIoTセンサに、以下のような機能を搭載し、地域住民の新しい防災ツールとして活用することを目指す。

- ① 危機管理型水位計を参考にした、ランニングコストの軽減を目的とする、洪水時のみ高頻度にデータ取得を行う機能
- ② 水位計とカメラを連携し、防災情報として洪水のような緊急時のみに情報発信する機能

3.2 令和元年東日本台風の群馬県下仁田町

群馬県甘楽郡下仁田町は群馬県南西部に位置し、人口約7,000人、65歳以上の割合が約45%の超高齢社会といった特徴を持つ。令和元年東日本台風では甚大な被害が発生した(図5)。河川水位が観測史上最大水位を記録、鐮川上流に位置し气象台のある西野牧地区では2019年10月10日(木)から10月13日(日)までの3日間で期間合計雨量496.5mmを記録し、町内全域に避難勧告が発令され、その後、下仁田町で初の避難指示が下河原地区に発令された。その際、役場職員が河川状況の確認に行くことや、住民に対し、車で直接、避難を呼び掛けに行くこととなった。また、下仁田町は東西に長く、災害発生時のパトロール領域は広大であるため役場職員の人手不足が問題となっている。そのため、災害時、多地点の情報を即時に一括で取得し役場職員が状況把握するだけでなく住民へ発信する必要があった。



図5 令和元年東日本台風の際の青岩公園の様子¹³⁾

3.3 下仁田町におけるIoTセンサの実証実験

群馬県甘楽郡下仁田町においてIoTセンサを設置し、防災分野における活用の検討を行った(図6)。下河原地区上流の鐮川と南牧川の合流地点である青岩公園にIoTセンサを設置し、実証実験を行っている(図7)。下仁田町におけるソフトウェアの開発フローを図8に示す。まず、カメラで合流地点の河川状況の撮影を行い、その画像に撮影場所や撮影時間の情報を記載する。撮影場所は事前に設定をした場所情報が記載され、撮影時間は画像データに含まれるExif情報から得て記載される。その画像を防災情報の発信の取り組み

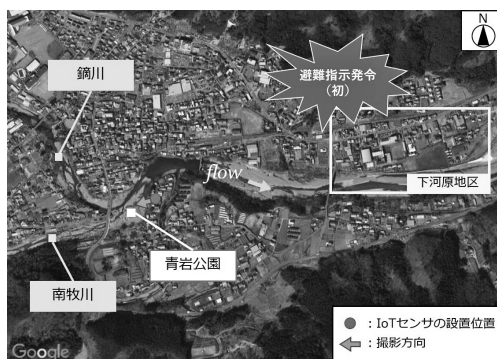


図6 青岩公園におけるIoTセンサの設置位置と周辺環境



図7 青岩公園(群馬県下仁田町)におけるIoTセンサ設置の様子

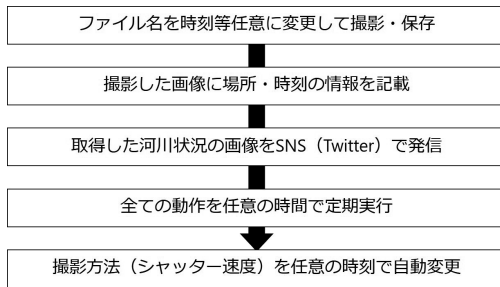


図8 下仁田町の実証実験における IoT センサのソフトウェアの開発フロー

として SNS (本実証実験では Twitter) へ投稿を行う。それら撮影、情報記載、情報発信といった一連の動作の定期実行をする。以上のようなフローでソフトウェアを開発した。撮影した画像を1時間に1回、Twitter^{14,15)}に自動投稿した。実際の投稿を図9に示す。また、Twitterへ投稿する際に画像とともにコメントも投稿することが可能である。

昼夜では明るさが異なるため、同様の撮影方法では河川水位を確認するための写真を撮影することは困難である。そこで、朝と夕方(本実証実験では6:00と17:00)に撮影方法の変更を行うことや、画像に記載される情報の文字の色を変更するプログラムを作成した。夜間の撮影においては昼間の撮影とは異なり、シャッター速度を遅くすることによって外灯の光を出来る限り取り込むことで河川状況の認識を試みた。夜間に撮影した結果を図



図9 青岩公園における Twitter の投稿による情報発信 (2021年12月7日16時00分)



図10 青岩公園(群馬県下仁田町)における夜間の撮影画像(2021年12月7日00時00分)

10に示す。結果として、IoT センサにより撮影した画像から河川状況の把握が可能であることを確認した。

また、本実証実験では投稿頻度を1時間に1回としたが、地震や洪水による災害が予想される際はシングルボードコンピュータである Raspberry Pi にリモートアクセスし、どこからでも遠隔で撮影頻度や撮影方法、投稿の際のコメントなどはプログラムを書き換えることで変更が可能である。本実証実験で行った Twitter は下仁田町の web サイトにも掲載され、住民に対する防災情報の発信にも貢献している¹⁶⁾。また、2021年12月24日に設置し、2022年6月30日現在まで、問題なく稼働している。

本実証実験で用いた IoT センサの総額は電源装置を含め、約5万円で作成することができ、通信費は、1ヶ月あたり通信量400MBで月額1,000円となった。ただし、本実証実験では下仁田町管理の立ち入り禁止場所に設置したため、盗難対策などは行わなかった。しかし、人の立ち入りが容易な場合、盗難対策が必須となる。その場合、追加の予算が必要となるが、一般的なセンサは約100万円¹²⁾といったように、非常に高額なためそれと比較すると安価である。

4. 構造物の維持管理への活用の検討

4.1 IoT センサによる構造物の維持管理

大規模な河川橋梁では、高価な地震計やカメラを用いてひび割れなどの損傷検知をリアルタイムで行っている。しかし、地方自治体の管理するよ

うな小規模な河川橋梁では、5年に1回の触診や打音検査による点検が義務付けられているが、技術者不足などの理由から目視点検のみで維持管理を行っている。また、ひび割れの起きやすい橋梁上部工下面は、足場などを組み立てなければ技術者や管理者が直接見に行くことは困難である。そこで、修繕時の足場を利用して、事前にモニタリングを行いたい箇所にIoTセンサを設置しておくことで、修繕による効果などの確認が可能になる。さらに、センサで河川水位の上昇を記録した際や、構造物の異常検知をした際にメールなどで知らせるアラート機能をプログラムしておくことで、技術者や管理者が異常を即時把握することが可能になる。また、多数ある構造物、災害が予想される場所に設置することで維持管理作業の効率化や、災害時の橋梁上の道路通行の判断に役立つことが期待される。また、開発するIoTセンサは地方自治体が管理する小規模な河川橋梁への設置を対象としているため、一団体が管理することは困難であると予想される。そこで、各地方自治体の技術者や管理者がIoTセンサの設置から操作を可能にする必要がある。そのためには一定以上の知識が必要だが、マニュアル等を作成することで誰でも使用できるようにする。また、将来的にはIoTセンサに加速度センサや距離センサを付随することによって得られるデータを数値解析することで、損傷検知や異常検知などの発展性もあると考えられる(図11)。

4.2 IoTセンサによるRC床版のひび割れの撮影

構造物の維持管理にIoTセンサを活用するため、RC床版のひび割れの撮影実験を行った。IoTセンサはこれまでの維持管理に代わるのではなく、点検・パトロール順序の決定やひび割れ過程の追跡といった維持管理の一助になることを目的としている。そのため、本実証実験ではひび割れ幅などの詳細なデータを取得せずに、ひび割れの有無が安価なカメラを用いて撮影した写真で判断可能か明らかにすることを目的とした。

インフラメンテナンスのためのリカレント教育事業であるREIM長岡高専¹⁷⁾(Recurrent Education of Infrastructure Maintenance)の実習フィールドにある供用後の劣化したRC床版を対象にIoTセンサによる撮影実験を行った。RC床版からカメラを2m離して観測を行い昼間と夜間に撮影を行った(図12)。本実験で用いたUNIROI社のカ

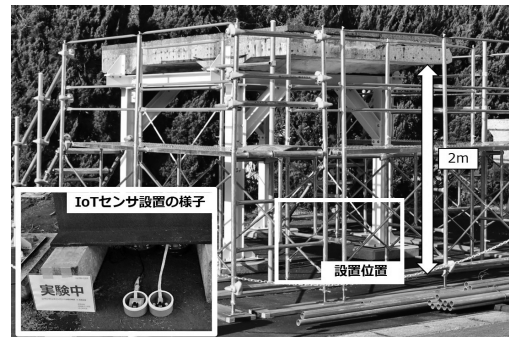


図12 長岡高専におけるRC床版撮影実験の様子

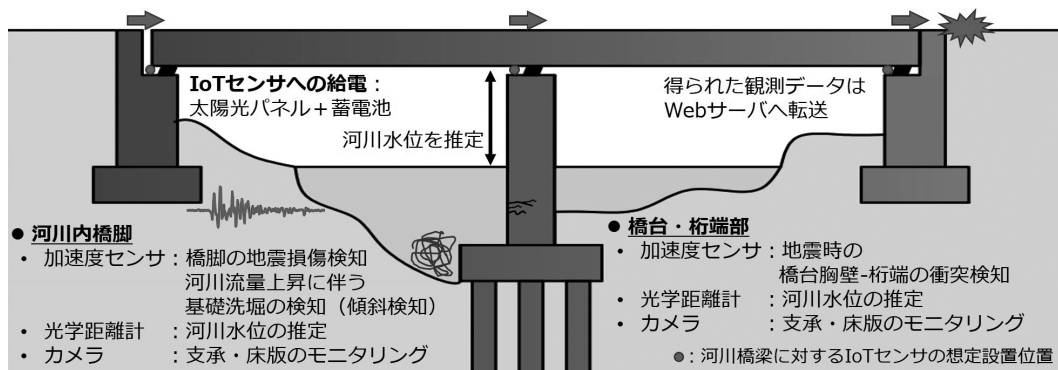
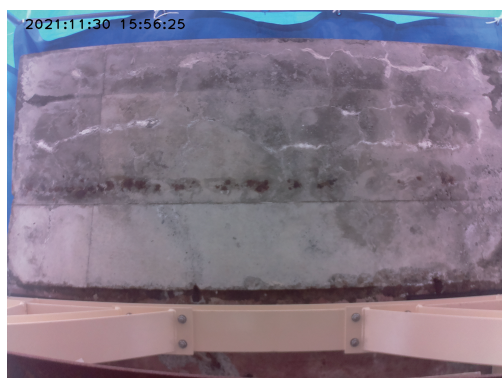
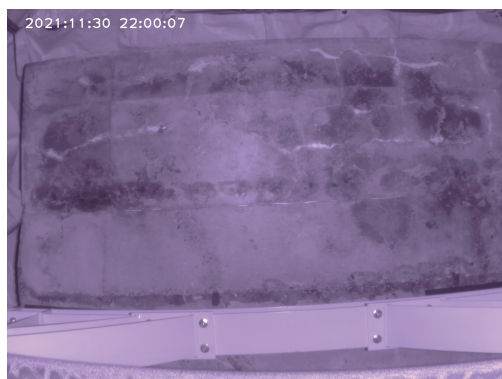


図11 IoTセンサによる構造物の維持管理への活用の概要図



(a) 2021年11月30日15時56分



(b) 2021年11月30日22時00分

図13 RC床版下部からのIoTセンサの撮影画像

メラモジュールは2592×1944ピクセルの静止画が撮影可能である。夜間撮影は青岩公園と同様である。実証実験の結果、IoTセンサで撮影した画像から、肉眼でひび割れを確認することができた。撮影結果を図13に示す。本実証実験では、カメラのみで実施した。しかし、将来的には加速度センサや距離センサ等から取得したデータの有効利用を目指しており、本実証実験では床版の写真により活用実現性を報告する。

5. 結論

本稿では安価な小型 IoT センサを開発した。また、独立太陽光発電を用いた屋外における稼働も円滑に行われた。今後、雨天などの繰り返しの悪天候の際にも稼働するかの検証も必要である。また、下仁田町で実施した、IoTセンサによる河川

状況の撮影および取得した画像の情報発信といった実証実験において、防災面における活用方法の一例を示した。また、IoTセンサに搭載された安価なカメラモジュールにより劣化したRC床版を撮影し、取得した画像からひび割れの確認することができた。この事は、構造物の維持管理における活用実現性を示した。今後、本稿で示したようなIoTセンサにより河川状況や構造物のひび割れといった情報を獲得し活用することで、防災および構造物の維持管理においてDX化の促進の一助になることが期待される。

謝辞

本研究は、一般財団法人野崎わかば会研究助成のご支援のもと遂行させていただきました。また、群馬県下仁田町役場、群馬県嬭恋村役場、長岡高専陽田修教授、東京高専小嶋徹也教授、福井高専芹川由布子助教、株式会社数理設計研究所矢澤正人氏、群馬高専地震工学研究室の皆様にご協力とご助言をいただきました。ここに感謝の意を表す。

引用文献

- 1) 藤野陽三・シリゴリンゴ ディオンシウス・並川賢治・矢部正明：2011年東北地方太平洋沖地震における横浜ベイブリッジの応答，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.69, No.2, pp.372-391, 2013.
- 2) Zuo Rongzhi・党紀・鶴野禎史・清水和弘・鈴木康寛：IoTセンシングによる橋梁支承の変位モニタリング手法の加発，第11回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集.
- 3) 小野寺周・吉田善紀・豊岡亮洋・林吾介・高橋宏寿：変位センサーによる支承部の地震後損傷推定手法の開発，鉄道総研報告，Vol.35, No54, pp.47-52, 2021.
- 4) 山下善道・内藤裕貴・稲葉修武・根本知明・金井源太，星典宏：営業再開後の通い農業を支援するハウス遠隔監視システムの開発とその展開，農研機構研究報告書，No8, pp.211-230, 2021.
- 5) 安田浩保：シングルボードコンピュータによる全天候・低照度時に対応した無人河川観測IoTシステムの開発，新潟県建設技術センター，第4回(平成28年度度募集，平成29年度助成)研究成果報告書，<https://www.niigata-ctc.or.jp/wp>

- content/uploads/2022/05/H29_jyosei_report_10.pdf (2022年6月30日閲覧).
- 6) Raspberry Pi Documentation. <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/> (2022年6月29日閲覧).
 - 7) Raspberry Pi Foundation. <https://www.raspberrypi.org/> (2022年6月29日閲覧).
 - 8) Raspberry Pi. GitHub. <https://github.com/raspberrypi> (2022年6月29日閲覧).
 - 9) 「見に行くだけだから」川沿いの自宅出たまま戻らず 宮城・61歳男性死亡, 毎日新聞, 2019-10-17, <https://mainichi.jp/articles/20191017/k00/00m/040/040000c>, (2022年6月22日閲覧).
 - 10) 後を絶たない台風のときに「川を見に行く人」にはどんな心理がはたらいているのか?, AERA dot., 2019-10-20, <https://dot.asahi.com/dot/2019101900015.html?page=1>, (2022年6月22日閲覧).
 - 11) 国土交通省関東地方整備局: 洪水に備えて web ページ, https://www.ktr.mlit.go.jp/river/bousai/river_index0001.html (2022年6月22日閲覧).
 - 12) 国土交通省: 危機管理型水位計の概要 web ページ, https://www.mlit.go.jp/river/mizubousaivision/pdf/honshou_kouhyoushiryou.pdf (2021年12月14日閲覧).
 - 13) 下仁田町防災マップ (令和3年6月発行) https://www.town.shimonita.lg.jp/soumu/m02/m02/2021bousai_map_all.pdf (2022年3月23日閲覧).
 - 14) Twython 3.8.0 Documentation. <https://twython.readthedocs.io/en/latest/> (2022年6月29日).
 - 15) Twitter (@GK_Shimonita) web ページ: https://twitter.com/GK_Shimonita (2021年12月9日閲覧).
 - 16) 下仁田町 web ページ: <https://www.town.shimonita.lg.jp/soumu/m02/m02/20211112163758.html> (2021年12月10日閲覧).
 - 17) REIM 長岡高専 web ページ: <http://www.nagaoka-ct.ac.jp/reim/> (2021年12月9日閲覧).

(投稿受理: 2022年3月31日
訂正稿受理: 2022年7月1日)

要 旨

昨今の社会問題として、頻発する自然災害やインフラの老朽化に伴う維持管理作業の増加、少子高齢化、人口減少に伴う働き手の不足等が挙げられる。本研究では、前述した問題を解決することを目的とした安価な小型 IoT センサを開発し、防災情報の取得・発信や、構造物の維持管理に関する実証実験を行った。防災分野における実証実験として、群馬県甘楽郡下仁田町を流れる河川合流部の水位状況を、IoT センサを用いて写真を撮影し、SNS への情報発信 (画像投稿) を実施した。また、構造物の維持管理に関する実証実験として、RC 床版下部のひび割れの撮影を行い、IoT センサを用いた構造物のひび割れ検出への適用性について検討した。防災分野および構造物の維持管理に関する実証実験は円滑に行われ、安価な小型 IoT センサ活用の実現可能性を示す結果となった。