

治水・利水対策のための 広域環境計測ネットワークに関する研究

福原楓[†] 千葉慎二[†]

近年の気候変動に伴い、各地で水害・土砂災害等が頻発・激甚化してきている。国土交通省はその防災・減災対策として、河川流域全体のあらゆる関係者が協働して流域全体で水害を軽減させる治水対策「流域治水」という考え方を提唱している。本研究では、広範囲な流域全体の水位や環境の計測をする低コストな LPWA 通信ネットワークを提案し、「流域治水」における環境監視への応用を試みた。本提案手法により宮城県北部のため池や用水路の監視を行う実証実験を実施し、およそ 10km に広がる LPWA 通信エリアを整備し、任意の位置での水位、地滑り、気象を計測して一括で監視するシステムを構築した。

Research on a Wide-Area Environmental Monitoring Network for Flood Control and Water Resource Management

Kaede Fukuhara[†] and Shinji Chiba[†]

In recent years, climate change has led to increasingly frequent and severe water-related disasters, such as floods and landslides. In response, Japan's Ministry of Land, Infrastructure, Transport, and Tourism (MLIT) has proposed the concept of "River Basin Disaster Resilience and Sustainability by All," a strategy in which all stakeholders within a river basin collaborate to mitigate flood risks across the entire watershed. This study proposes a low-cost LPWA (Low Power Wide Area) communication network for wide-area water level and environmental monitoring and explores its application in "River Basin Disaster Resilience and Sustainability by All". A demonstration experiment was conducted to monitor reservoirs and irrigation channels in northern Miyagi Prefecture. The experiment established an LPWA communication network covering approximately 10 km and developed a system that enables integrated monitoring of water levels, landslides, and meteorological conditions at arbitrary locations.

1. はじめに

近年の気候変動に伴い、各地で水害・土砂災害等が頻発・激甚化してきている。国土交通省は、河川管理者が主体となっていく治水対策に加え、氾濫域も含めて一つの流域として捉え、その河川流域全体のあらゆる関係者が協働し、流域全体で水害を軽減させる治水対策「流域治水」(図 1) を令和 2 年に提唱し、防災・減災が主流となる社会を目指した水害対策を行っている[1]。



図 1 流域治水の地域相関図[1]

我々は「流域治水」の中でも集水域にあたるため池に着目した。ため池とは、農業を営む際に降水量が少ない地域や近隣に河川が存在しない場合、その点を補うために人工的に造成された池のことである[2]。集水域としての役割は、雨水貯留浸透設備の整備や治水利用である。近年の気候変動による災害に備えて防災重点ため池も基準が見直され、震度 5 以上の地震が発生した場合、発災後 24 時間以内にため池点検を行い、国のため池監視支援システムに結果を入力するように義務付けられることとなった[3]。しかし、現在の水位監視・管理は、各地の自治体職員による現地の目視で行っていることがほとんどであり、ため池が山中にある等アクセスが悪く 24 時間以内にデータ入力が行えない事例が発生している。

[†] 仙台高等専門学校
National Institute of Technology, Sendai College

本研究では、水位や環境の計測をする低コストな LPWA 通信ネットワークを提案し、ため池環境の遠隔監視によって発災時の状況確認の課題を解消する。また監視対象に用水路も含めて日常的に環境監視をすることで、利水への活用も検討する。

2. 研究概要

我々の研究室では、令和 4 年度から宮城県及び加美郡西部土地改良区の方々に協力していただき実証実験を行っている[4][5]。実証実験では、図 2(左)に示した概要の水位監視システムを開発し、加美郡の対象地域に本システムを構成する各種機器を設置した。LPWA には Private LoRa を用いているため LPWA の通信料はかからない。ゲートウェイとクラウドデータベース間は携帯回線や Wi-Fi を使用可能である。水位計測は 10 分周期で行われ、加美町西改良区事務所に設置されているゲートウェイに向けて LPWA 通信で送信される。データを受信したゲートウェイはインターネットに接続し、クラウドデータベースに水位データを記録する。LPWA 通信には独自のメッシュネットワークを構築している。一般のメッシュネットワークは Mobile Ad hoc Network で実装されているものが多いが、本システムでは事前にルーティングテーブルを作成せず、ブロードキャストで周辺ノードにデータを送信する方式をとっている。各ノードは受信データをバッファに蓄積し、バッファ内データを順次再送し、バッファに存在するデータを再び受信した場合は信号を破棄することでブロードキャストストームを防いでいる。図 2(右)に、構成機器の一つとなる中継器の設置例を示した。これまでの我々の取り組み[3][4]により、LPWA 通信網の整備、水位モニタ用 Web ページの作成、国のため池監視支援システムとの連携プログラムの開発を行ったが、通信インフラの安定性と耐久性強化が引き続き課題となっていた。

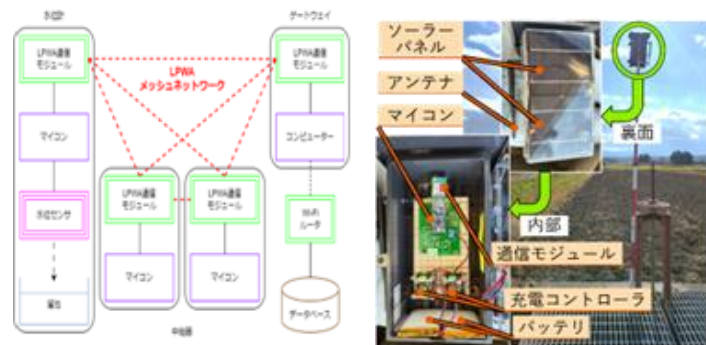


図 2 システム概要(左)と中継器設置例(右)

本研究では、既存の通信インフラの通信安定性と耐久性強化への取り組みに加え、ゲートウェイ・中継器増設による通信インフラの拡張、水位センサノードに加え気象センサノード、地滑りセンサノードを開発して加美町各地に設置し、各地の環境モニタリングを可能とする。環境モニタリングは自治体職員が利用しやすいよう、遠隔監視用の Web システムを開発し、自治体へのヒアリングを行いながら改良を行い、システム全体の安定化と利便性の向上を目指す。

3. 通信インフラの拡張と LPWA 通信の安定化

3.1 システムの拡張

我々が設置した各機器の設置場所を図 3 に示す。ゲートウェイは二つ設置しており(図中右下と左上)、2つのエリアで通信を行っている(図中赤丸)。本研究で新たに設置した機器は図中左上の通信エリア内の機器、右の通信エリア内の地滑りセンサである。既存の機器については通信の安定化を図る改良を行った。以下の各小節で本研究で新たに実施した内容について説明を行う。



図 3 加美町ため池監視システム設置場所

3.2 地滑りセンサノードの設置

地滑りセンサノードは、小台 2 号ため池の土手に設置した(図 4)。加速度センサによってノードを設置したポールへの傾きを計測することで、地滑りの状態を計測する。通常は 12 時間周期で傾斜計測値をクラウドデータベースにアップするが、傾斜計測値が設定した閾値を下回った場合アラートが発生し、10 分周期で傾斜計測値をクラウドサ

一歩にアップする仕組みとした。



図4 地滑りセンサノード

データベースにアップされた傾斜計測値の例を図5に示す。傾斜計測値は図中のslopeの値である。本件で使用した加速度センサの計測レンジは±16gで傾斜角の解像度が荒くなってしまったため、今後は±2gの計測レンジの加速度センサに変更を予定している。

```

_id: ObjectId("67a362809316be1cd98fbb3f")
hops: 47
seq: 119
SourTag: "2001"
DestTag: "ffff"
sensorID: 6
version: 1
deviceID: 112
repeaterState: 1
VCCLevel: 14
slope: 68
th_slope: 45
alert: 0
time: 2025-02-05T13:07:12.522+00:00
    
```

図5 傾斜計測データ

3.3 水位センサノード、気象センサノードの設置

連携地域では、農業用水の管理のために土地改良区の職員が頻繁に用水路の水位確認をする必要がある。確認する用水路は広範囲に分布するため、その作業負荷は大きい。そこで確認対象の用水路がある加美郡加美町宮崎寒風沢地区に、水位センサノードと気象センサノードを設置した(図6)。同地区を既存ゲートウェイの通信エリアに

含めるには多くの中継器の設置が必要のため、本研究では寒風沢地区用に新たにゲートウェイを設置することとした。水位センサは農業用水管理および治水対策の水位監視に利用し、気象センサは防災への利用を想定している。



図6 寒風沢センサノード設置位置

気象センサは”風向・風速・気温・降水量・湿度・日射量”以上の6つの項目を計測している。計測データの例を図7に示す。図内の黒丸部分は風速が速いことが分かる。実際にアメダスを確認すると、両日他の日に比べて風速が5m越えとなっている。特に1日は警報級の風が吹いていたため、このシステムでの計測情報が、災害情報として役立つことが確認できた。

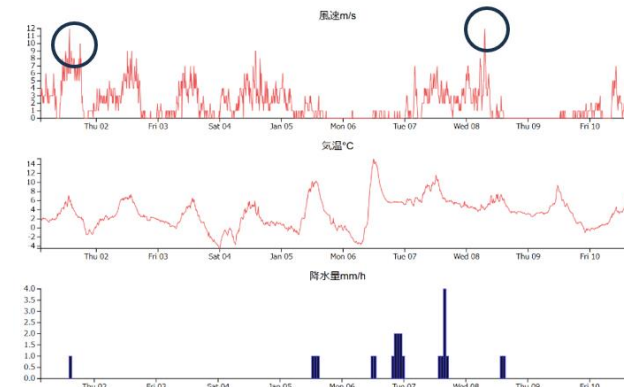


図7 気象センサノード計測結果

用水路に設置した水位センサノードについては、設置当初は水面までの距離が実際の距離よりもかなり短く計測される結果が見られた。これは、水位を計測する超音波センサの計測エリアに用水路の蓋が重なっていたことが原因と判明し、図 8 (右) のようにセンサ位置の調整で解消した。



図 8 水位センサノードの超音波センサ位置変更前(左)と変更後(右)

3.4 LPWA 通信の安定化

我々がこれまでの実証実験で整備した LPWA 通信網では、設置当初は安定した通信が維持されるものの、数ヶ月経過すると通信が不安定になり、最終的には通信が停止する中継器が多発していた。本研究で設置した中継器の状態やプログラムの見直しを行った結果、中継器の基板の接触不良とプログラムのバグが原因であることが判明した。プログラムについては、変数に適切な型指定がなされていないために動作が不安定となっていたため、バグを修正したプログラムで全てのノードを書き換えた。接触不良については、コントローラである Arduino pro mini と LoRa 通信モジュール間の接続に問題があった。この接続にはピンヘッダーとソケットを用いており (図 9 左)、長期間の使用で接触不良が起り LPWA 通信ができないトラブルが発生していた。そこでこの接続をより強固なものとするため、Grove universal ケーブルに交換した (図 9 右)。この改良によって接触不良のトラブルは解消された。

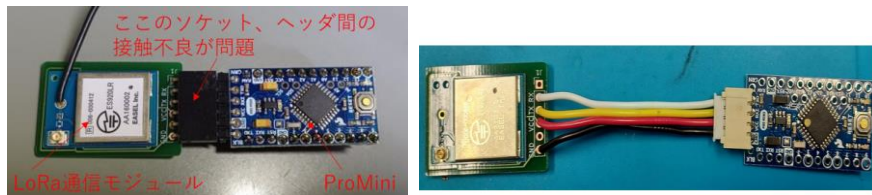


図 9 中継器 LPWA 通信回路接続部の改良前(左)と改良後(右)

以上の改良を設置している全てのの中継器に施した。改良の効果を確認するため、改良前後のキープアライブ信号の到達率を比較した。中継器は死活管理のため 6 時間周期でキープアライブ信号を送信しており、その信号はクラウドデータベースに記録される。到達率 r_{rate} とは、ある期間 $T[h]$ のキープアライブ信号受信回数について、実際の受信回数 n_a の論理的な受信回数 n_1 に対する割合と定義する。中継器のキープアライブ信号の周期は $6[h]$ なので $n_1 = T/6$ となり、中継器のキープアライブ信号の到達率は式(1)のように表すことができる。

$$r_{rate} = 6 \frac{n_a}{T} \times 100 [\%] \quad \text{式 (1)}$$

中継器改良前の 2 か月間(2024/01/01 ~ 2024/03/01)と改良後の 2 か月間(2024/12/05 ~ 2025/02/05)の、各中継器のキープアライブ信号到達率の比較を表 1 に示す。

表 1 各中継器キープアライブ信号到達率の改良前後の比較

中継器番号	改良前		改良後	
	n_a	$r_{rate} [\%]$	n_a	$r_{rate} [\%]$
1	102	41.8	238	96
2	3	1.2	235	94.8
3	62	25.4	209	84.3
4	169	69.3	240	96.8
5	0	0.0	24	9.7
6	164	67.2	241	97.2
7	165	67.6	234	94.4

表 1 より、改良後に全ての中継器の到達率が上昇していることが確認でき、中継器番号 5 以外は 84%以上の到達率となった。中継器番号 5 については今回の改良では十分な改善に至らなかった。その原因については今後詳細な調査を行う予定である。本件の LPWA 通信網はメッシュ型であり、中継器はセンサノードとゲートウェイ間に冗長な経路が形成されるよう十分な数を設置している。よって中継器番号 5 が不良であっても、センサネットワークとしての機能には何ら影響はない。

4. 環境モニタ Web システムの開発

これまでに開発してきたシステムの計測データや機器の状態の監視を行うための環境モニタ Web システムの開発を行った。図 10 に開発中の加美町環境監視ページを示す。加美町に整備した各種センサノード、中継器、ゲートウェイの各マーカーが地図上に表示されており、マーカーの色によってその稼働状態（青：稼働中、黒：停止中）を示している。各機器とマーカーの対応については表 2 に示す。

加美町（ため池）環境監視ページ



図 10 加美町環境監視ページ

表 2 各機器のマーカー

機器名	ゲートウェイ	中継器	水位センサノード	地滑りセンサノード	気象センサノード
マーカー					

地図上のマーカーをクリックすると、その場所に設置された機器の情報（機器設置時の写真、最新データ受信時刻）がポップアップで表示される。水位センサノードのポップアップについては、水位の変化を確認できるようにセンサ計測値（センサから水面までの距離）もグラフ表示可能とした(図 11)。

加美町（ため池）環境監視ページ



図 11 水位センサ計測値のグラフ表示

本 Web システムの開発により、システムを構成する多数の機器の状態を一目で確認することが出来るようになり、今後センサノード等のインフラを加美郡西部土地改良区全域まで拡張しても、効率的にシステム管理を行うことができるようになった。

5. 連携機関へのヒアリング

連携機関である宮城県北部地方振興事務所と加美郡西部土地改良区へ本研究の成果を報告し、成果の評価や残された課題等についてヒアリングを行った(図 12)。

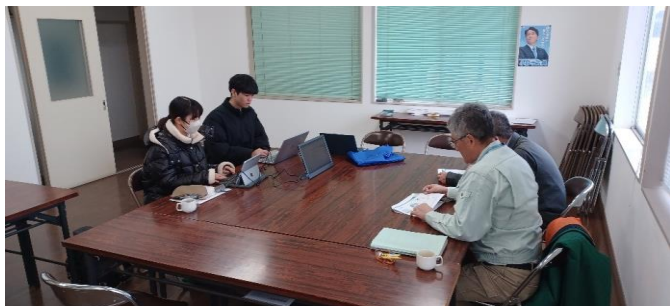


図 12 連携機関へのヒアリングの様子

5.1 雪対策

まず初めに上げられた課題は雪への対策である。実証実験地である加美町は豪雪地帯に指定されており、設置している器機への雪や強風の影響が無視できない。図 13 に寒風沢地区に設置した機器の冬期の状態を示す。冬期は深い雪に埋もれてしまい、図中の水位センサノードは LPWA 通信モジュールを設置したポールが強風で折れてしまっている。ソーラーパネルが雪に埋もれて発電ができず、機器が停止してしまう状態も時々発生している。現在はアンテナ部を補強し、除雪をすることで運用を維持しているが、次年度以降は機器の設置方法を工夫して豪雪と強風の対策を行う必要がある。



図 13 寒風沢地区の水位センサノード (左) と気象センサノード&ゲートウェイ (右)

5.2 環境モニタ用 Web システムの評価

4 章に示した環境モニタ Web システムの改良点について連携機関の方から意見を頂いた。水位はセンサから水面までの距離で示すのではなく、水底から水面までの距離に換算し、グラフは棒グラフではなく折れ線グラフで示したほうが良い。水位の基準値などが設定できて、それを超える水位となったらアラートを発信するようにしてほしい。治水・利水管理者の新人教育の場面で活用できると良い。以上の意見をいただいた。今後はこれらの意見を参考に Web システムの改良を行い、来年度本システムを本格的に活用してもらえることを目指す。またマーカーが重なると非常に醜くなるため、マーカーのデザインについても改良を進める。

5.3 システム拡張

本システムの拡張と機器の設置場所について検討した。まずは水位センサノードの拡張設置について意見があった。現在本研究で水位監視を行っているのは図 14 に示した 2 か所である。来年度以降は、この 2 か所に加えて猪沢 2 号ため池の水位監視も行うこととなった。猪沢 2 号ため池は、現在設置している小台 2 号ため池と同じ防災重点ため池に指定されている。震度 5 以上の地震が発生した場合 24 時間以内に目視確認を行う必要があるが、ため池周辺は小高くなっており 1 本道の林道を通らなければいけないためアクセスが悪い。このため池へ水位センサノードの設置を行うことで、本システムの Web ページにて常時監視できるようになり、管理作業の負荷が大きく軽減されることが期待できる。

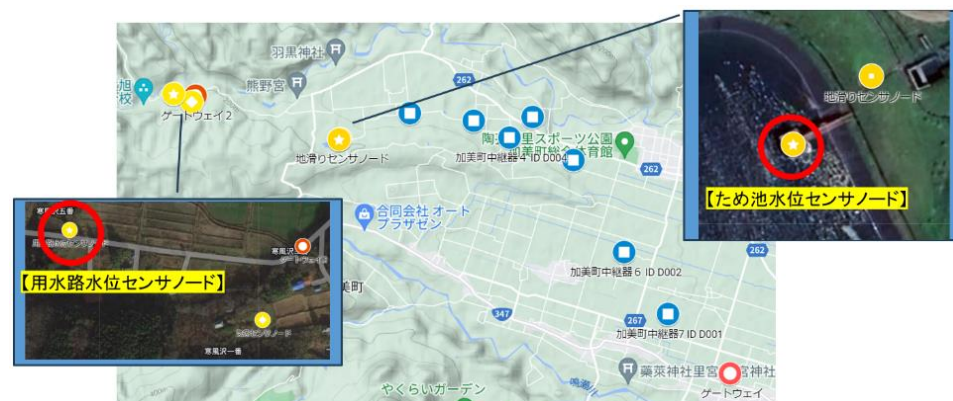


図 14 現在の水位センサノード設置場所

また現在設置している地滑りセンサノードの設置位置の変更も考えている。現在地滑りセンサノードは小台 2 号ため池の土手に設置しているが(図 14 のため池センサノード付近), あまり地滑りが懸念される場所ではないためセンサの有効性が低い。地滑りセンサノードをより有効活用するには, 地滑り発生の可能性が高い開墾堰付近に設置した方が良いという意見があがった。

6. まとめ

本研究では, 既存の通信インフラの通信安定性と耐久性の強化, ゲートウェイ増設による通信インフラの拡張, 各種センサノードの追加設置, 環境モニタ Web システムの開発を行った。その結果 LPWA 通信網で安定した通信を行えるようになり, Web システムによる各機器の効率的な状態監視, センサ計測値のモニタを可能とした。しかし雪や強風による設置危機への影響は大きく, 更なるノードの耐久性強化と各ノードの設置場所を精査していくべきであることが確認された。

今後はシステムの拡張性を活かしつつ, 監視対象のため池や水路を増やすことが考えられる。それに伴い, 設置している全ての機器や Web システムのメンテナンスが必要不可欠となってくる。これらの日常的なメンテナンスは自治体職員が担うことになるため, 本システムの利用を担当部署の新人育成に導入することも検討を進めている。

参考文献

- 1) 国土交通省, 「流域治水の推進」
<https://www.mlit.go.jp/river/kasen/suisin/index.html>
- 2) 農林水産省, 「ため池」
https://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/
- 3) 農林水産省, 「防災重点農業用ため池に係る防災工事等の推進に関する特別措置法(令和 2 年法律第 56 号)について」
https://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/koujitokusohou.html
- 4) 工藤響, 千葉慎二, "ため池群広域水位監視システムの実証実験について", 信学技報, vol. 122, no. 73, RCS2022-54, pp. 178-181, 2022 年 6 月
- 5) 工藤響, 千葉慎二, "防災重点溜め池群広域水位監視システムの電源と設置地点の検討", 情報科学技術フォーラム講演論文集 (FIT) 21(4) 197-198 2022 年 8 月