

河川堤防の変状検知システム 実験結果（磁気センサ、加速 度センサによる検知）

越水実験結果報告書

ELSPINA VEINZ INC.

目次

1. システムの概要.....	2
2. システムの原理.....	3
3. 技術の特徴、アピールポイント等.....	7
4. 現場実装で想定される配置方法.....	9
5. 実験の計画（目的・システムの配置）.....	11
6. 実験結果.....	13
7. 現場実装へ向けた考察.....	17
参考文献.....	19

1. システムの概要

本提案では、変状を検知するために、磁気スイッチセンサー、及び加速度センサーを活用する。センサー本体、あるいは対となる磁石が初期設置位置から動くことで、変状を間接的に検知するものである。それぞれの変状検知のイメージを図1と図2に表す。

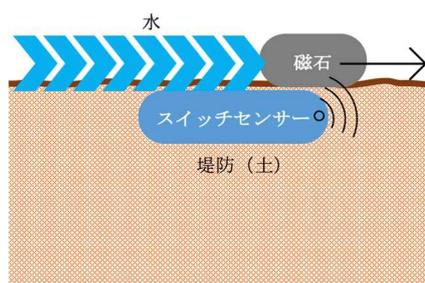


図 1 磁気センサーによる変状検知



図 2 加速度センサーによる変状検知

変状検知後、無線通信で、その検知情報を上位側へ送る (図3)。ここでは、無線通信として、LPWAN の1つ LoRaWAN を活用する [1]。



図 3 システムの全体概要

2. システムの原理

磁気スイッチセンサーの場合、磁石とセンサーが接する状態から離れた状態に、状態変化をセンサーが検知することで、堤防の変状を間接的に検知する。

加速度センサーの場合、越水後の侵食により当該センサーが流されたことを加速度変化により検知し、堤防の変状を間接的に検知する。

実際の設置環境下を想定した場合、以下の観点について考察する必要があると考えた。

- ✓ 埋設下での温度で動作が可能か？
- ✓ 土に埋設された状態でも、上位側にデータが届くか？
- ✓ 水に流されるような動きを、加速度センサーで検知可能か？
- ✓ スイッチセンサーは、水の流れにより磁石部分とセンサー部分が離された状態を検知可能か？

上記の観点から、市中で購入可能な種類の異なるセンサーノードを3つ用意し、汎用の IP67 ケースで密閉し、堤防天端から 10cm 下に設置することとした。

- A) 9 軸加速度センサーノード（充電型リチウムイオン電池）
- B) 磁気スイッチセンサーノード（コイン型リチウムイオン電池）
- C) 3 軸加速度センサー&磁気スイッチセンサー同時搭載ノード（塩化チオニルリチウム電池）

それぞれの製品概要は、**表 1** の通りである。

表 1 設置センサーの製品情報

	A:	B:	C:
メーカー	Dragino	Dragino	ELSYS
型番	LGT92 [2]	LDS101 [3]	EMS [4]
用途	屋外での人・モノの位置検知	ドア開閉検知	ドア開閉検知 室内環境検知
電池	充電型リチウムイオン電池 1000mAh	コイン型リチウムイオン電池 225mAh	塩化チオニルリチウム電池 2600mAh
電池寿命	通常利用で、1週間から1ヶ月動作	12,000回(拡散率7、信号強度)のアップリンク通信が可能	通常利用で、10年以上
搭載センサー	9軸加速度 GPS	スイッチ	3軸加速度 スイッチ 温度 湿度 漏水
動作の仕組み	ファームウェア ¹ で、「加速度の閾値」等が設定可能で、「動きの検知感度」を調整する。通常、人の動きを感知することが可能。	磁石強度にも依存するが、磁石とセンサーが2cm程度離れると開閉状態が変化する。	ファームウェアで、「加速度の閾値」等が設定可能で、「動きの検知感度」を調整する。通常、ドアの動きを感知することが可能。また、磁石とセンサーが2cm程度離れると開閉状態が変化する。
通信契機	<ul style="list-style-type: none"> 動き検知毎 一定の時間間隔毎(設定可能) 	<ul style="list-style-type: none"> 開閉状態変化毎 一定の時間間隔毎(設定可能) 	<ul style="list-style-type: none"> 動き検知毎 開閉状態変化毎 一定の時間間隔毎(設定可能)
単価/台(概算)	1万円程度	5千円以下	1万円以下

¹ センサーノードのコントロール基板にインストールされたソフトウェアで、センサーからの電気信号や通信の制御を行うもの。

センサーノードは電池駆動で、GPS を搭載しない製品は、搭載電池で数年の利用に耐えうるものである。また本製品としては対応していないが、IP67 対応のパッケージング（表 2）のカスタマイズを行うことで、耐候性を備えることが可能である。

表 2 センサーノードの外観（IP67 ボックスに収納）

	A:	B:	C:
	加速度センサー	スイッチセンサー	加速度+スイッチセンサー
密閉前	 <p>左: センサー</p>	 <p>左:磁石、右:センサー</p>	 <p>左:磁石、右:センサー</p>
密閉後			

センサーノードは、通常はディープスリープモードで、その消費電力は μA レベルである。「動き」や「スイッチの状態変化」を捉えて上位へ通信を行う。また、設定によっては所定の時間間隔（インターバル）で通信することもできる。

センサーノードから上位への通信は、LoRaWAN 技術を活用している。LoRa 変調方式の特徴でもあるが、ゲートウェイ側で帯域幅²や拡散係数³が都度最適に制御される。センサーノードからゲートウェイを経由して上位（アプリケーション側）にデータが届くまで、概ね 1 秒以下である。

1 つのゲートウェイで通信可能なエリアは、その設置場所の周辺環境に依存する。見晴らしの良い場所では、数 10 km 届く場合もあれば、ビルやマンションが

² LoRa 無線通信を行う際の周波数帯域。LoRaWAN では、125kHz、250kHz、500kHz が用いられる。

³ 受信感度とデータ転送速度に影響を与える係数。

立ち並ぶ市街地では、1～2km しか届かない場合もある。

ゲートウェイが上位側と通信するためには、有線 LAN/WiFi/3G/LTE を利用しインターネット接続する。

上位側では、送られてくるセンサー情報を蓄積・可視化するアプリケーションを用意し、最新状態を監視することが可能である。上位のアプリケーションについては、様々な方法（Web アプリケーション、メール通知、チャットツールとの連携など）が考えられる。

3. 技術の特徴、アピールポイント等

LoRaWAN は、現在主に欧米や中国でエコシステムの広がりを見せている。そのため、LoRaWAN センサーノードは、非常に安価に欧米や中国の様々なメーカーから入手が可能である。したがって、低コストで、より多くの場所へ設置することができる。

通常の利用では、LoRaWAN センサーノードの設置場所は、地上である。例えば、農業分野などでは、土壌の湿り具合を計測するために、土壌センサー部分を地中に埋め、通信アンテナや演算処理を行う基板部分はセンサーとケーブルで繋ぎ地上に設置する。

海に関する様々なデータを取得できる海洋センシングプロジェクトである OMNI Ocean Monitoring Network Initiative) [5]でも、海上に様々なセンサーを搭載した LoRaWAN センサーノードを浮かべ、温湿度・海水レベルなどを常にセンシングしている。

ただし、今回の実験のように、通信アンテナ、基板、センサー部分を全て地中に埋設するケースは非常に稀である。

深さに限界はあるものの、水中・土中でも通信が可能であり、また通信距離が長くできるのも、LoRa 変調技術に寄るところである。

地中に埋没する場合は、通信特性だけが課題ではなく、防塵・防水対応も大きな課題である。アンテナ・基盤・センサー全体を塵・水から守る必要があり、IP67 対応のケースで収納することが好ましい。漏水センサーや屋外利用を想定した LoRaWAN センサーノードでは、IP67 対応製品もしばしば見受けられる。IP67 対応の収納ケースも市中で入手可能であり、専用の製品を整備することも容易であると考えられる。

IP67 による収納により、通信アンテナ、基板、センサー部分の再利用も可能である。本実験においても、実験後も LoRaWAN センサーノードを利用できている。

LoRaWAN センサーノードの多くは、電池駆動である。GPS を利用せず、加速度センサーやスイッチセンサーだけを搭載しているセンサーノードは、利用可能な期間が年単位と長い。

ゲートウェイも、センサーノード同様、屋外設置型の製品が市中で購入可能である。上位側との通信を 3G/LTE の SIM を活用することで、一般電源による電源供給さえ可能であれば、どのような場所でも設置・利用可能である。

ゲートウェイを広範囲に設置するには様々な課題があるが、昨今欧州では、LoRaWAN ゲートウェイの機能を搭載した低軌道衛星が打ち上げられ、課題を解決しようとしている [6]。

センサーノードが低軌道衛星を通じてデータ通信できる環境が整備されれば、低軌道衛星とゲートウェイを補完的に利用することで、より低コストで、より広範囲に通信可能な環境を作り出せる。

例えば、20m 間隔でセンサーノードを設置し、ゲートウェイを 1.5km 間隔で設置する場合、機器（ノード、ゲートウェイ）、通信・サーバ（初期）、設置にかかる概算費用は、100m 単位で 300 万円以下を想定できる。また、維持管理としては、LoRaWAN サーバ、アプリケーションサーバ、ネットワークにかかる費用が主要な要素である。管理対象のセンサー数・ゲートウェイ数にもよるが、100m 単位で、年間 20 万円程度で実現できると想定できる⁴。

前述の通り、本提案手法は、活用が広がっている技術・製品を組み合わせたもので、低コストに、かつ時間帯・天候には左右されることなく変状を検知でき、社会実装の 1 つの選択肢となり得るものであると考える。

⁴ 製品次第であるが、定期送信間隔を数時間程度の場合、5 年程度電池を交換せずに動くものがあり、その様な製品であれば、電池交換等のメンテナンスが不要なため、維持管理コストを劇的に減らすことが可能と考えられる。

4. 現場実装で想定される配置方法

堤防が変状するであろう状態にも依存するが、センサーノードを 20m 程度の間隔で埋設することが想定される。

ゲートウェイは、その設置場所の周辺環境に依存するため一概にはいえないが、例えば、堤防から 1km 離れた場所に、等間隔で設置していくなどが考えられる（図 4）。

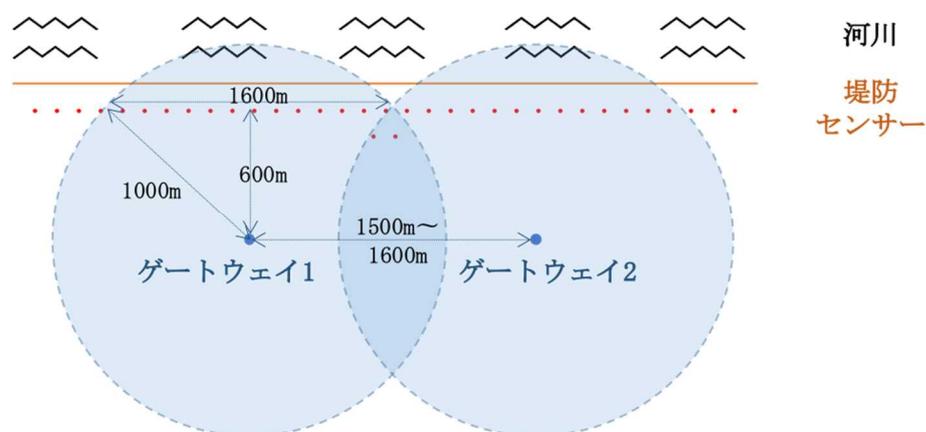


図 4 センサーノードとゲートウェイ設置例

それぞれのゲートウェイの通信エリアをより広く確保するためには、周辺環境で高いビルなどの屋上に設置することが望ましい（図 5）。上位側への通信手段として 3G/4G の通信 SIM を用いることで、設置現場では電源のみ確保すれば良い。



図 5 屋外型 LoRaWAN ゲートウェイの設置例 (当社事例)

5. 実験の計画（目的・システムの配置）

本実験において、センサーノードを埋設する深さ（天端から10cm）の土が流されたことを、実験環境下で正しく検知できるか否かを確認することを主眼においた。

センサーノードが状態変化を検知した後、ゲートウェイを経由してアプリケーションまでデータを届ける部分については、考察対象とはしなかった。実用上問題ないことは、数多くの社会実装で証明されているからである。

3つのセンサーノードは、**図6**の通り、等間隔で設置した。「B: スイッチセンサー」、「C: 加速度+スイッチセンサー」は、センサー側を下部に、磁石側を上部に乗せるように設置をした。

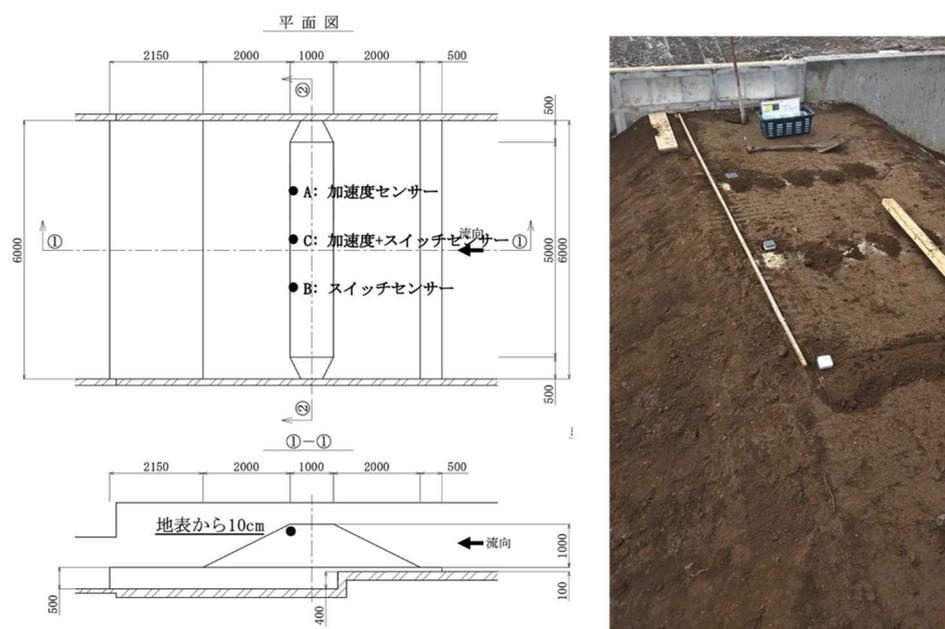


図6 実際のセンサーノードの埋設状況

この際、「B: スイッチセンサー」と「C: 加速度+スイッチセンサー」は、スイッチセンサーが「閉じた状態」としておくために、磁石側とセンサー側の向きを揃えて設置する必要がある（**図7**）。



図 7 埋設時の磁石側とセンサー側の方向合わせ

ゲートウェイについては、屋内用ゲートウェイを用意し、センサーノード設置場所から直線距離で 20m 弱のプレハブ母屋内に設置をした。ゲートウェイから上位側へは LTE 通信用 SIM を利用した。

上位側は、LoRaWAN サーバとして無償で利用できる TTN (The Things Network) [7]と、当社独自開発のアプリケーションを利用し、通信ログを確認できるようにした。

6. 実験結果

センサーノードのファームウェア仕様・設定 (表 3) から、それぞれのログからどのように変状を検知しうるかを整理した。

表 3 各センサーノードの通信発生・ログ仕様

センサー	センサーからの通信発生・ログ仕様	備考
A: 加速度	<ul style="list-style-type: none"> ・[動き検知] 一定の加速度を超えた場合フォーマット A でデータをアップリンク ・[インタバル] 動きを検知しない場合、前回送信時から一定の間隔で、フォーマット A でデータをアップリンク 	<ul style="list-style-type: none"> ・設置したセンサーノードでは、インタバルを 1 時間に設定
B: スイッチ	<ul style="list-style-type: none"> ・[スイッチ変化] スイッチの状態 (開閉) 変化を検知すると、フォーマット B でデータをアップリンク ・[インタバル] 状態変化がない場合、一定の間隔で、フォーマット B でデータをアップリンク 	<ul style="list-style-type: none"> ・フォーマット B に、開閉状態を表す値が含まれる ・設置したセンサーノードでは、インタバルを 20 分に設定
C: 加速度+スイッチ	<ul style="list-style-type: none"> ・[動き検知] 一定の加速度を超えた場合、“動いた”ことを検知し、フォーマット C1 でデータをアップリンク。ただし、“インタバル”送信後、最初の検知時のみアップリンク。 ・[スイッチ変化] スイッチの状態 (開閉) 変化を検知すると、フォーマット C2 でデータをアップリンク ・[インタバル]一定の間隔で、フォーマット C3 でデータをアップリンク 	<ul style="list-style-type: none"> ・フォーマット C2 に、開閉状態を表す値が含まれる ・フォーマット C3 には、“動き検知”アップリンク後に“動きを検知した回数(動作検知回数)”、“開閉状態”の値が含まれる ・設置したセンサーノードでは、インタバルを 1 時間に設定

センサーノードは、通常はディープスリープモードで、その消費電力は μA レベルである。「動き」や「スイッチの状態変化」を捉えて上位へ通信を行う。また、設定によっては所定の時間間隔 (インタバル) で通信することもできる。

表 3 に基づき、通信が発生する一般的な状態とデータフォーマットを図 8 として表現した。

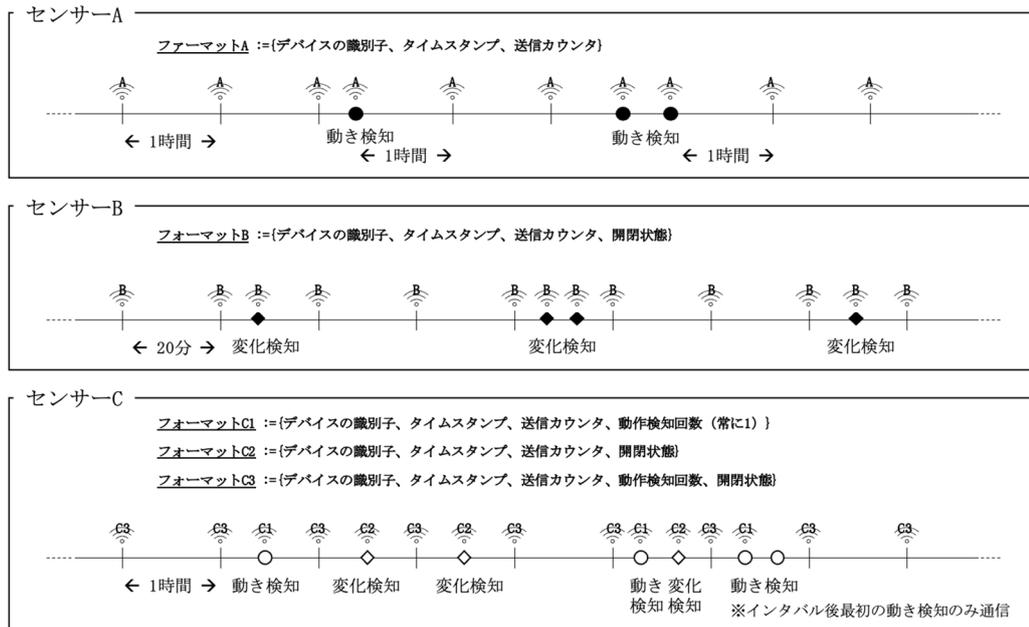


図 8 センサー検知と通信の関係

LoRaWAN の仕様で、センサーノードがデータをアップリンクするたびに、連続的に送信カウンタ値⁵を+1 する。そのため、通信ログから上位側でパケットロス⁶をしているか否かを、この送信カウンタ値から判断することが可能である。

実験では、13:21 に越水が発生した。その後、「B:スイッチセンサー」、「C: 加速度+スイッチセンサー」、「A:加速度センサー」が流されていることを、目視で確認した。

目視確認を踏まえ、各センサーノードの越水前後の通信ログを抽出し、模式的に状態を表現したものが図 9 である。

⁵ センサーノードが LoRaWAN サーバ側へ参加（一般に、ジョインと言う）した時点で 0 で初期化され、データを送信する都度、送信データに付与される送信回数のこと。

⁶ ここでは、センサーノードから上位側へデータをアップリンクしているにも関わらず、上位側でデータを受信できないことを意味する。

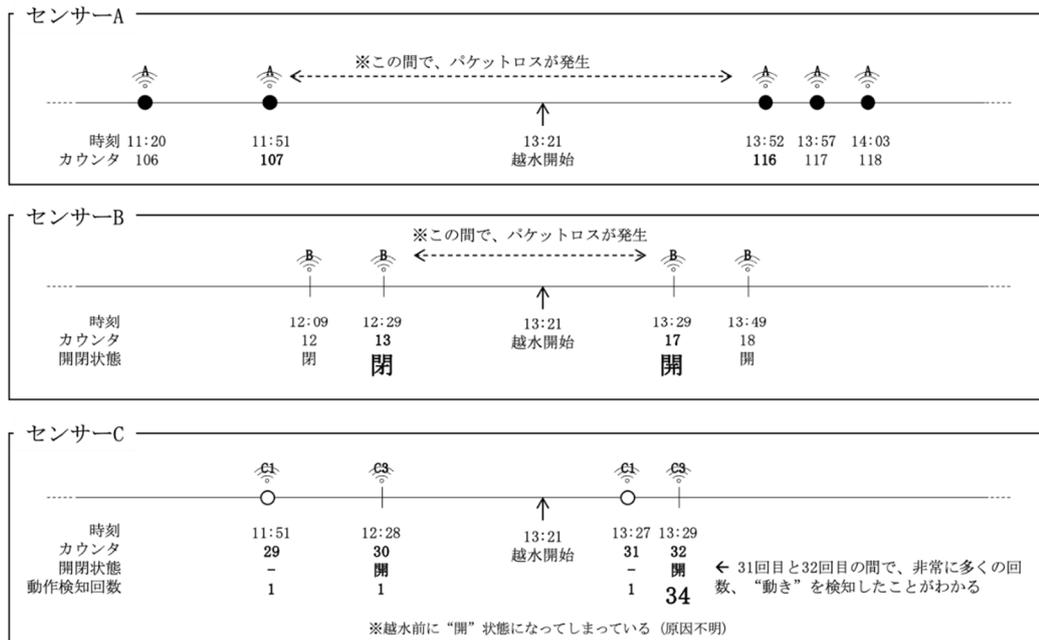


図 9 通信ログからみた越水開始前後の状態

「A:加速度センサー」は、2時間でカウンタ値が14増加している。つまり、インタバル以外の「動き検知」によるアップリンクがあったが、パケットロスがあり上位側でログできなかったと考えられる。

「B:スイッチセンサー」も同様である。1時間にカウンタ値が4増加している。本来、「スイッチ変化」を検知せずインタバルだけであれば3回である。少なくとも1回は、「スイッチの変化」を13:27より前に検知していることが推察される。

「C: 加速度+スイッチセンサー」は、実験開始前（11:51）になんらかの動きを検知している。その後、インタバル送信がある（12:48）。この時点では、まだ埋没された状態のままでもかかわらず、スイッチの状態が“開”であることがわかる。本来であれば“閉”であることが期待される。後述するが、設置時のミスの可能性もある。越水開始後、13:27に動きを検知している。その後、13:29にインタバル送信があるが、この際に動作検知回数が34となっている。このことから、13:27から13:29にかけて、“動き”を多く検知しており、越水により変状が検知していると推察される。

一方、実験動画からは、13:28より以前から「C: 加速度+スイッチセンサー」のセンサー部分が剥き出しになっており（図 10）、流水により振動を受けていることが見て取れる。13:29:23には、センサー部分が流出していることがわかる（図 11）。



図 10 センサー側が剥き出しになっている様子 (13:28)



図 11 センサー側が流出した瞬間 (13:29:23)

7. 現場実装へ向けた考察

本実験を通して、いくつかの現場実装へ向けた考察を行う。

1つ目は、利用する電池の動作温度である。実験当日早朝、現場は氷点下であった。

「B:スイッチセンサー」は、早朝6時を最後に、午前11時まで通信ログが一切記録されていなかった。ログから送信カウンタの値がクリアされていることがわかった。搭載しているボタン型リチウム電池の動作温度が0℃以上であることを鑑み得ると、一度電源供給が止まった可能性がある。

現場実装では、「C:加速度+スイッチセンサー」に搭載した塩化チオニルリチウム電池のように、氷点下でも動作できる電池を利用することが求められる。

2つ目は、設置の問題である。「C:加速度+スイッチセンサー」の設置方法から考えた場合、時系列で「フォーマットC3ログ(インタバル)」、「フォーマットC2ログ(スイッチ変化)」、「フォーマットC1ログ(動き検知)」のログが記録されることが期待される。本実験では、「フォーマットC2ログ(スイッチ変化)」を記録していない。この要因としては、センサー部分と磁石部分の設置方向のミスが考えられる。

現場実装では、設置方向を意識せず検知できる仕組みが求められる。例えば、収納ボックス面を覆うことのできる程度の磁石を使うなどが挙げられる。

3つ目は、加速度センサーを利用する場合の感度の問題である。感度を高めると、越水による振動ではなく、通常時の天端からの振動を動きとして検知してしまう。設置現場の状況も考慮した感度設定を行う必要がある。

最後に、パケットロスの問題である。今回は屋内用のカバーエリアの狭いゲートウェイを利用したこと、そして、ゲートウェイのソフトウェア面での設定を最適化していなかったことが原因と考えられる。

現場実装では、現場設置環境を鑑み、また試験的な電波伝播の測定を行い、最適なゲートウェイと設定を行うことが必要であるとする。

- ✓ 埋設下での温度で動作が可能か？
- ✓ 土に埋設された状態でも、上位側にデータが届くか？

- ✓ 水に流されるような動きを、加速度センサーで検知可能か？
- ✓ スイッチセンサーは、水の流れにより磁石部分とセンサー部分が離された状態を検知可能か？

これらを踏まえて、実験前に想定した以下の観点に対して、考察を行う。

「埋設下での温度での動作」について、氷点下ではボタン型リチウム電池での動作は不安定であると考えられるが、塩化チオニルリチウム電池は問題ない。動作保証温度が幅広い電池を利用することが推奨される。

「埋設状態でのデータ通信」について、一部パケットロスはあるもののデータ通信自体は可能であった。パケットロスについては、さらなる検討が必要である。

「水に流されるような動きに対する加速度センサーの有効性」について、1つのセンサーでは検知できていることから、「動きに対する感度」設定を最適化することで、有効なものであると考えられる。

「スイッチセンサーの有効性」について、設置のミス、パケットロスの発生から評価が難しい。ただし、通信ログから判断すると利用可能なものであると考えられる。さらなる検討が必要である。

参考文献

- [1] LoRa Alliance, “LoRa Alliance,” [オンライン]. Available: <https://loralliance.org/>.
- [2] Dragino Technology Co., LTD., “LoRaWAN GPS Tracker with 9-axis accelerometer-LGT92,” Dragino Technology Co., LTD., [オンライン]. Available: <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-end-node/item/142-lgt-92.html>.
- [3] Dragino Technology Co., LTD., “LDS01 -- LoRaWAN Door Sensor,” Dragino Technology Co., LTD., [オンライン]. Available: <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-end-node/item/157-lds01.html>.
- [4] Elektroniksystem i Umeå AB, “EMS,” Elektroniksystem i Umeå AB, [オンライン]. Available: <https://www.elsys.se/en/lora-ems/>.
- [5] O. M. N. Initiative, “Ocean Monitoring Network Initiative,” [オンライン]. Available: <https://www.designlab.ac/omni>.
- [6] Lacuna Space Ltd., “Kicking off 2021 with great news! Lacuna Space starts operations of third satellite in orbit,” Lacuna Space Ltd., 18 1 2021. [オンライン]. Available: <https://lacuna.space/lacuna-space-starts-operations-of-third-satellite-in-orbit/>.
- [7] The Things Network, “The Things Network,” [オンライン]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/>.