

河川越水を検知するリアルタイム水位検知杭の提案

桑田 司^{1,a)} 立野 倫太郎^{1,b)} 成尾 一征^{1,c)} 山本 昭 岡田 謙吾 岩井 将行^{1,d)}

概要: 近年、不規則気象により甚大な自然災害などで堤防決壊、土砂崩れなどが多発し甚大な被害が出ている。その中で主な被害の原因は、水により引き起こされることが多い。河川などでは、決壊などの前段階で越水が起こる。したがって、越水が始まったことを検知することができれば、早めに避難を始めることができ、人的被害を最小限に抑えることができる。そこで、本稿ではセンサ杭での越水検知システムを提案する。堤防などの堤防に杭を打ち込み、防水気圧センサを用いて水位を計測する。その計測値を LTE 回線でサーバに送信し、越水とそのレベルを検知、ユーザに知らせるシステムを開発した。この提案システムの評価の予備実験としての水位センシングの実験を行い、越水の検知及び水位状況の報告が行えることを確認した。

A Proposal of Real-Time Water Level Measuring Piles for Detecting River Floods

1. はじめに

近年、局地的な豪雨や台風による風水害が多く発生している。2019 年には台風 19 号では阿武隈川や千曲川の堤防が決壊という大きな被害があり、7 県で河川の氾濫、決壊が相次いだ。浸水面積は西日本豪雨（平成 30 年 7 月豪雨）の約 1 万 8500 ヘクタールを上回った。また令和 3 年 7 月伊豆山土砂災害において 2021 年（令和 3 年）7 月 3 日午前 10 時半（JST）ごろに、静岡県熱海市伊豆山地区の逢初川で発生した大規模な土砂災害があったことが記憶に新しい。水害は大規模河川だけでなく支流などでも発生するため、低コスト・省電力で持続可能な河川水位モニタリングを可能にする直接携帯網通信センサノードが必要となる。令和 3 年 7 月には伊豆山土砂災害において、静岡県熱海市伊豆山地区の逢初川で発生した大規模な土砂災害があったことが記憶に新しい。こちらは河川越水ではな盛土の崩落であるが水災害による上流の水に滞留や異常な流れはいち早く下流に居住域や新幹線などの重要なインフラに対して危険性を通達する必要があると考える。

住民が常に水位などを監視できるには IoT センサノードにより広範囲のセンシングが不可欠である。越水による氾濫検知のため、排水処理を妨げず、設置が容易である必要があり、小型で自律的に稼働するセンサを複数設置し可能な形態が求められる。リアルタイムで水位を住民が知ることによって避難の指針としたり、避難経路としてリスクを表示するなどシステム構築が期待できる。我々はセンサ正面空間の水位検知無線センサを内容した通信機能付きのセンサ杭を開発した。

2. 関連研究

水検知の関連研究では、単純に 2 つの電極を用いて水によって短絡することで水を検知するものも存在する [2]。これらはセンサ部分が直接水に接触するため、長期間の運用によって精度が劣化する懸念がある。また、水圧によって水位を計測する静水圧方式 [3] も存在するが、越水時には水流や大気圧による影響を補正する必要がある。ダムや河川の水位計測には、水面にフロート（浮き）を設置し、液体の浮力によって上下することで、水位を検知する方法が用いられている [4][5]。この方式では設置のコストとメンテナンスが高い。以上のような、水に接触するセンサを越水時に適用すると、数値の誤差の恐れもある。超音波センサは防水加工することが難しいため、水没によって故障する。これを越水が起こりうる場所に設置した場合、氾濫によって

¹ 東京電機大学未来科学部情報メディア学科
SenjuAsahi 5, Adachi, Tokyo 120-8551, Japan
a) kumeta@cps.im.dendai.ac.jp
b) ritu@cps.im.dendai.ac.jp
c) naruo@cps.im.dendai.ac.jp
d) iwai@cps.im.dendai.ac.jp

水没する危険性があり、安定的に運用することは難しい。静電容量を計測することで水位を計測する方法は、非接触かつ安価に実装できるため、様々なものが提案されているが、タンクや配管等の容器の側面から水の動きが一定で安定した水面を計測するものがほとんどである [8][9][10][11][12]。そのため、これを用いて越水時において水を検知するためには、検討の余地がある。我々は今まで、目立たず、かつ低コストで細やかに地下空間での氾濫を検知することを目指し、排水溝内での氾濫検知に静電容量方式の水位センサの適用を提案してきた [14]。防水非接触型水検知無線センサノードを開発し、ノードに設置された銅テープ正面空間の静電容量が、水面との距離やその他の条件によってどのように変化するかを評価実験により確かめ、実験環境においてセンサから 8.80cm 以内の水面の距離を計測することが可能であるという結果を得たが大規模の急激な越水検知には測定距離の関係から不向きである。

3. 提案手法

3.1 手法

本研究では、急激な越水検知に気圧センサ利用した水位計測を行い。更に堤防の崩壊予測に2つに深さの土中水分センサを使用する。入水方面に向けて土中水分センサを高低差つけて計測す。これにより堤防の崩壊の様子を正確に推定する。実際に越水したかどうかは、越水検知に気圧センサ利用した水位計測であり低コストなセンサとなっている。また通信部分は計測データをリアルタイム WioLTE を用いて LTE 回線 AWS に送信している。

3.2 データ送信

計測したデータは、WioLTE を使用して LTE 回線で Soracom を中継し Amazon Web Service へ MQTTS で送信される。送信されたデータは、DynamoDB に保存される。保存されるデータは、空気中の気圧と水中の気圧、土中水分高、土中水分低である。それらの数値を AWSLambda で計算し水位の上昇速度と水位を検知します。

4. システム概要

4.1 システム構成

本研究の提案システムの外観及び構成図をそれぞれ図 1、図 2 に示す。

センシングにはマイコンに WioLTE、センサに気圧センサ LPS33HW と DFRobot 社の土壌水分センサ SEN0193 しており、電源として Li-ion バッテリ 5000mA の 2 並列と WioLTE への電力変換を行う DC/DC モジュールを用いている。図 1 上部の灰色の箱に WioLTE 及びバッテリー等の給電系が収められており、その下部の杭部分に地表用気圧センサ及び 2 つの土壌水分センサを取り付けている。センサ杭に搭載する機能として、水位及び深さごとの土中

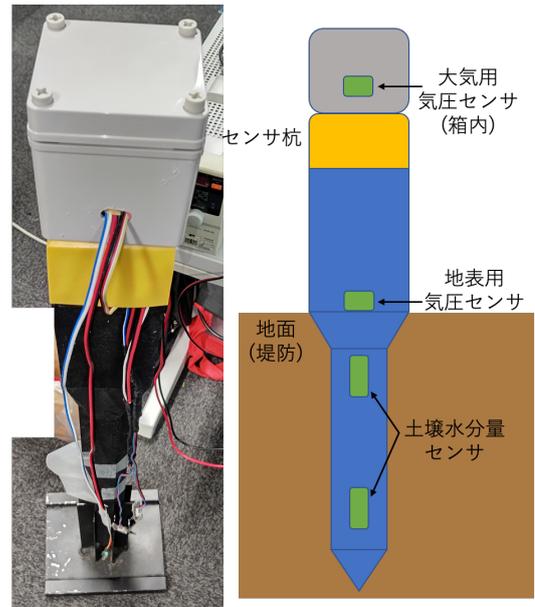


図 1 水位センサ杭の外観

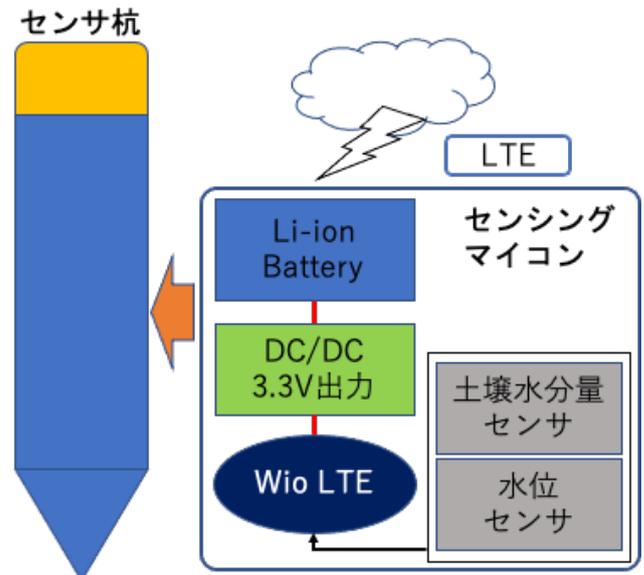


図 2 システム構成

水分量を測定する機能と取得したセンサデータを LTE 回線を通じてクラウドのデータベースへ一定間隔毎に送信する機能がある。これらの機能の実装方法として、まず水位の測定は、気圧センサ LPS33HW を 2 つ用いて行う。この気圧センサは、一方をセンサ杭上部の防水箱内に取り付け、もう一方はセンサ杭設置時に地表部となる位置に取り付ける。防水箱内の気圧センサは大気圧の値が測定され、地表部の気圧センサは、越水等が発生していない時は大気圧の値、越水発生時には大気圧に加えて堤防天端からの水圧値が測定される。水圧は以下の式より求められ、水密度 $\rho = 1.0 \times 10^3 [kg/m^3]$ 、重力加速度 $g = 9.8 [m/s^2]$ とすると、水位 10cm ごとに約 9.8hPa 増加する。

$$p = \rho hg \quad (1)$$

したがって、越水時の水位は、防水箱内と地表部それぞれの気圧の差を求め、上記の式を用いて求めている。また、水密度と重力加速度は定数として計算している。

土壌水分量の測定は静電容量感知式の土壌水分量センサから求めている。土や水などに触れていない状態での出力値 $sense_{max}$ を最大、水中に投入している状態での出力値 $sense_{min}$ を最小とし、下記の式より土中水分量を百分率で算出している。

$$SoilMoisture[\%] = \frac{(x - sense_{max})}{(sense_{min} - sense_{max})} \quad (2)$$

また、使用している土壌水分量センサの出力値は最大最小値含めて各センサごとに差があるため、それぞれ空気中と水中での値を事前に測定し、使用センサに合わせて上記の式の計算を行っている。今研究で使用したセンサの最大最小測定値を 1 に示す。

表 1 土壌水分量センサ

センサ	最大値	最小値
地表部	628	428
地底部	541	370

これらのセンサデータ及び算出した値は WioLTE を用いて LTE 回線からクラウド上のデータベースにアクセス、送信することで保存を行っている。

4.2 ブロック図

本研究の提案システムのブロック図を図 3 に示す。Li-ion バッテリは充電率によっておよそ 2.7 4.2V の出力であるため、WioLTE 及び各種センサの前に DC/DC である TPS61200 を用いた電圧変換を行い、3.3V を生成している。気圧センサ LPS33HW は I2C で WioLTE と通信を行うため、WioLTE の信号用接続ピンは 1 つとなる。土壌水分センサはアナログ信号を出力しているため、WioLTE では受信用に 2 つのピンを使用している。

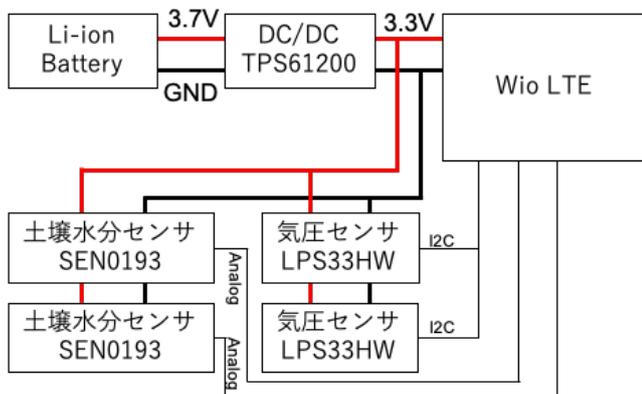


図 3 システム構成

5. 実験

5.1 実験装置 土中水分

今回の実験で使用する装置として水槽の長さ 60cm × 高さ 36cm × 奥行 30cm で検証をした。堤防と見立てるのが高さ 16cm × 長さ 45cm で越水の実験を行う。

水槽にポンプで一定の水を流し込み川の越水を再現した。また、本研究は、最終的に杭の内部にデバイスを入れるため今回は、堤防天端に小型な杭を刺し裏のり面に水圧センサを装着させた。土中水分は設置個所の高低差つけて設置することで崩壊具合を計測できるようにした。実験装置を図 4 図 5 に示す。

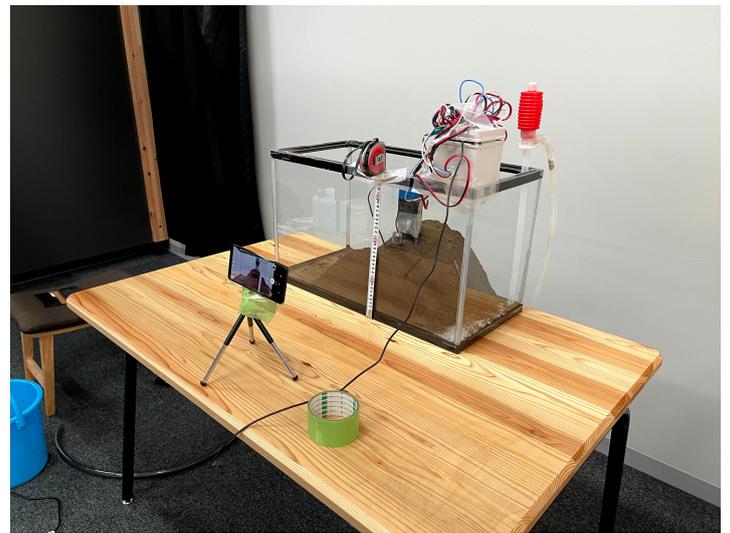


図 4 屋内実験環境 1

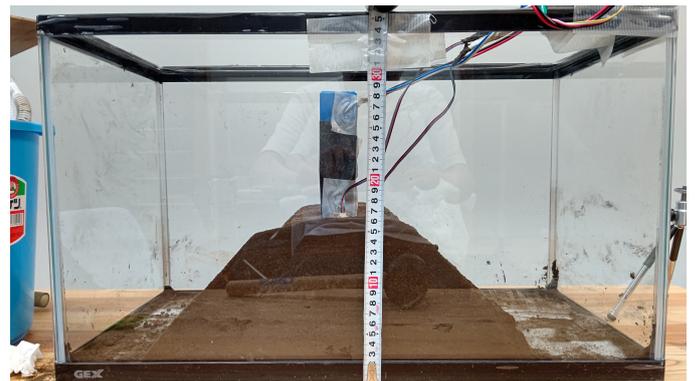


図 5 屋内実験環境 2

5.2 屋内実験方法

ポンプから一定の速度で入水を開始し越水を再現する。裏のり面側に来た水は、ポンプで吸い上げ、水が蓄積させないようにする。実験は堤防が決壊するまで続け、データはクラウドを介さずリアルタイムで pc で記録する。

5.3 実験装置 気圧センサ

屋外実験では、大規模な越水実験を行い、越水を検知、どの程度越水が起こっているのかを実験する。

ここでは、バッテリーで動作させ送信感覚を1分に1回に設定をした。屋外実験での設置風景を図6に示す。



図6 屋外実験環境

5.4 屋外実験方法

この実験では、規模が大きいため、WioLTE と SIM カードを使用しインターネット通信を可能にした。データ送信には、Soracom を中継しクラウド上のデータベースにリアルタイムで記録されるようにした。通信方式はデバイスから Soracom までは MQTT でクラウドに送る際は、MQTT S での送信になる。

6. 評価

6.1 屋内実験の評価

屋内実験では、土中水分の変位に注目して行っている。結果は図7に示す。実験の際、地表部の土中水分に関しては、あまり水を浴びていなかった。なので、オレンジの部分が緩やかに変化している。しかし、地底部では、水が浸透してきているのが図の通りわかる。青い線が地底部の線だが、水が浸透してきたとたん急激に変化しているのが読

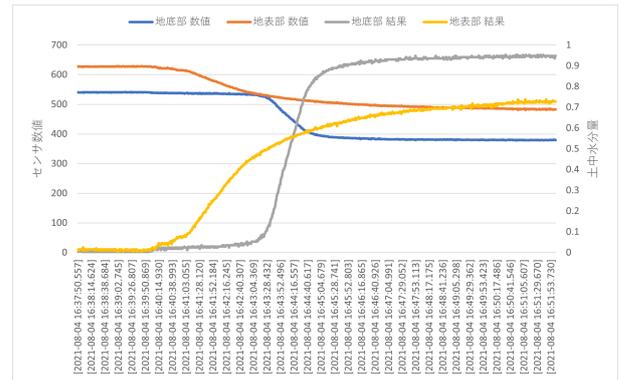


図7 屋内での結果

み取れる。これにより堤防内部での固まった土が水を含むことにより崩壊の危険性が高くなり大規模な被害が起こる可能性がある屋内実験の終了後の堤防を図8に示す。

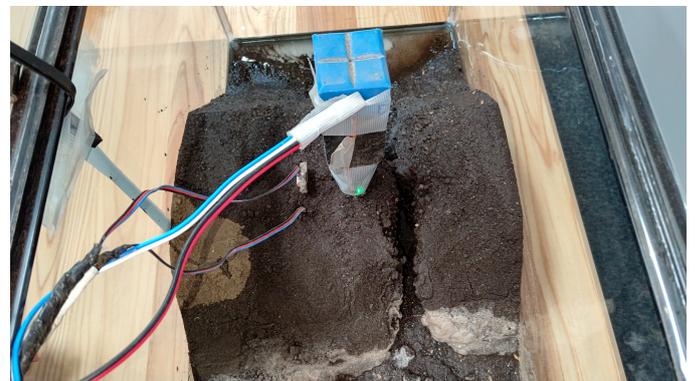


図8 実験後の堤防

6.2 屋外実験での評価

屋外実験で気圧センサが記録したのを図9に示す。越水が始まった直後気圧センサーが急激な変化を表している。また、気圧センサは、単独測位の場合、気圧の変化を計算に含まなければ誤差を出してしまう。そのため計測では、気圧センサを2つ使用している。そうすることで気圧の変化に対して柔軟に対応することができるからだ。また、図の結果からも越水開始から継続され続けていても水位を測定し続けることができた。

7. まとめ

実験結果として、土中水分の変位に関しては、水の浸透具合の差分がとることができたため、センサ部分の堤防が決壊した場合の検知も数値が即座に変位するため検知可能であると考える。別日に行われた越水実験では、水圧センサを取り付けた杭が越水時、約10cmと記録されているためこちらの検知も想定通りの動作とデータをとることができた。

今後は、越水時の気圧センサにかかる気圧と流れがない

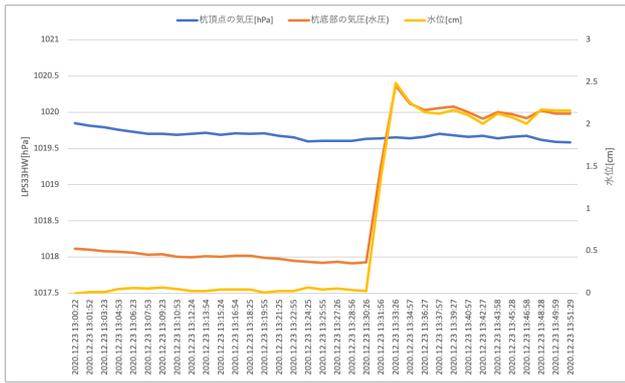


図 9 越水時の気圧センサ

ときの水圧でどれほどの差が出るのか、水の流れる速度を割り出すことができれば、越水量を想定することが可能と[12]考えるからだ。また、堤防決壊がどういった要因が一番負荷がかかるのかなど土中水分と組み合わせて調査していくのだ。今後は、越水時の気圧センサが水流がない実験環境[13]と実際の洪水などでの水圧の変化としてどれほどの差が出るのか、水の流れる速度や力を割り出すことができれば、越水のレベルを一つのセンサでより高精度に推定することが可能になる。また、堤防決壊がどういった要因を土中水分と組み合わせて他の箇所のセンサと融合して検証するシステムやより省電力や発電式のセンサ杭杭を実環境で運用し検証していく予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K11949 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] 総務省. 水防法等の一部を改正する法律 改正の概要.
http://www.mlit.go.jp/river/suibou/pdf/suibouhou_gaiyou.pdf

[2] Seeed Development. Grove - water sensor.
<http://www.seeedstudio.com/depot/grove-water-sensor-p-748.html>.

[3] A. Jahn, F. Ehrle, and C. Roppel. A level sensor for fluids based on hydro-static deformation with piezoelectric generated sounds in a low frequency range. In 2014 6th European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC), pp. 245–249, 2014.

[4] 鈴木洋之, 落合厚, 須賀正志, 溝口敦子. 小規模ダム貯水池で洪水時に生じる流量推定精度の劣化. 土木学会論文集 B, Vol. 65, No. 2, pp. 81–86, 2009.

[5] 坂西研二, 芝野和夫, 大嶋秀雄. 農村地域小河川における水質モニタリングに関する調査事例. 土壌の物理性, Vol. 80, pp. 49–54, 1998.

[6] Hung-Ying Chang, Yu-Chung Chang, Hao-Jan Sheng, Ming-Yue Fu, Wen-Fung Liu, and Raman Kashyap. An ultra-sensitive liquid-level indicator based on an etched chirped-fiber bragg grating. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 28, No. 3, pp. 268–271, 2016.

[7] Lei Chen, Xinmin Dong, Jie Han, and Ping Ye. Development of a ultra-sonic instrument for the sealed container's liquid level measurement. In Intelligent Control and Automation,

2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on, Vol. 1, pp. 4972–4976. IEEE, 2006.

[8] K Chetpattananondh, T Tapoanoi, P Phukpattaranont, and N Jindapetch. A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor. Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 209, pp. 175–182, 2014.

[9] Satish Chandra Bera, Jayanta Kumar Ray, and Subrata Chattopadhyay. A low-cost noncontact capacitance-type level transducer for a conducting liquid. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 55, No. 3, pp. 778–786, 2006.

[10] Ferran Reverter, Xiujun Li, and Gerard CM Meijer. Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor. Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 138, No. 1, pp. 1–8, 2007.

[11] Marco Demori, Vittorio Ferrari, Domenico Strazza, and Pietro Poesio. A capacitive sensor system for the analysis of two-phase flows of oil and conductive water. Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 163, No. 1, pp.172–179, 2010.

Konstantinos Loizou and Eftichios Koutroulis. Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system. Measurement, Vol. 89, pp. 204–214, 2016.

Paul Badger. Capacitive sensing library.
<http://playground.arduino.cc/Main/CapacitiveSensor?from=Main.CapSer>

林晃輔, 近藤亮磨, 岩井将行.” 排水溝内での静電容量センサおよび距離センサによる内水氾濫検知システム “, 計測自動制御学会 計測部門スマートセンシングシステム部会, 9月 10-13, 2019