

# 技術紹介

## 2

## 防災用水位計の開発

### Development of capacitive water level sensor

山根 康平	Kohei Yamane	商品開発センター
松崎 政彦	Masahiko Matsusaki	商品開発センター 主任
田村 博規	Hironori Tamura	商品開発センター 主任
市川 真太郎	Shintaro Ichikawa	商品開発センター 技術マネージャー

キーワード: 静電容量センシング、IoT、水位計、LPWA、流域治水

Keywords : Capacitive sensing, IoT, Water level sensor, LPWA, Flood control measures

### 要 旨

日本国内では気候変動による水害の激甚化が危惧されています。要因の一つとされる温室効果ガスの排出量をコントロールする緩和策が重要である一方、気候変動が引き起こす災害に対して社会のレジリエンスを高めることは喫緊の課題です。適応策として流域治水が注目されていますが、人口流出が顕著な地方都市では第一次産業の従事者が管理してきた水域の維持に人手がつかず、水害リスクの増加が懸念されています。

小規模河川は広範囲に広がるため、治水システムには低コスト性・柔軟性がもたらわれ、IoT(Internet of Things)が得意とする領域であると考えられます。その治水システムの末端デバイスである水位計は、コスト面において特に重要な要素だと考えています。

本稿では、当社の加速度センサにおける検出技術を応用し、高いカスタム性と低コスト性を有する静電容量型の水位計開発の取り組みについて、ご紹介します。

### SUMMARY

In Japan, there is a growing concern about floods due to climate change. While reducing greenhouse gas emissions is important, it is more urgent for society to increase its resilience to disasters caused by climate change. However, due to the outflow of population in rural areas, there is a lack of manpower to maintain watersheds that used to be kept by primary industry workers.

Small water bodies in rural areas have been facing risks of floods, so flood control systems are required. Flood control systems for small rivers in wide areas must be low-cost and flexible. IoT (Internet of Things) is suitable for such systems. Especially, level sensors are key to cost savings since the terminal devices abound in the system. This paper reports on the development of a low-cost capacitive level sensor with high customizability by applying JAE's detection technology in accelerometers.

## 1. はじめに

持続可能な開発目標(SDGs : Sustainable Development Goals)の目標 13「気候変動に具体的な対策を」には早急な気候変動対策の必要性が掲げられており、気候変動の要因の一つとされる温室効果ガスの排出量をコントロールする緩和策が世界的に注目を集めています。一方、気候変動による影響として中・大規模災害の増加が指摘されています。<sup>1)</sup>世界各地で報告されている災害への対策は喫緊の課題であり、社会のレジリエンスを高める適応策が欠かせません。日本国内では水害の激甚化が進んでおり、特に地方都市の地元住民や自治体が管理している小規模水域での氾濫・決壊・土砂崩れのリスクが高まっていることから、国土交通省を中心として流域治水を推進しています。<sup>2,3)</sup>日本の田園風景における人間社会と自然の関わりは枯山水や里山などに象徴されるように、注意深い人手が介在することによる調和であったように思われます。それが都市圏との格差拡大・人口流出・少子高齢化などに挙げられる地方の農村社会の変容により失われつつあり、水資源に代表される自然とのかかわり方について見直しが迫られています。

第一級河川などの大規模な水域は国や都道府県単位での管轄であることから、土木工事に大規模な予算が配分され広域に渡る流域治水が実現されています。一方、予算規模が小さい地方都市は小規模で広範囲な治水システムが必要です。このような治水システムにおける技術的な課題として、仕様を一律化させることが困難なことが挙げられます。デバイスの設置個所や設置方法、さらにはゼロベースではなく既存システムへ追加するケース、通信インフラ環境も一律でないことが想定されるからです。最終的には導入を検討する個人や自治体に対して、費用対効果が出ることを想像させる状態で提供できなければなりません。したがって小規模水域の治水システムは種々雑多な状況に対応できる仕様の柔軟性、ユーザビリティが求められています。

治水システムのトータルコストを下げるためには末端のデバイスが鍵となるため、水位計の方式の検討を行う必要があります。その水位計の必要条件には低コスト、省スペース、省電力が挙げられ、これらを有する静電容量型水位計が望ましいと考えました。しかしながらこの方式は検出体の誘電率の変動の影響、付着物、大きなダイナミックレンジなどの問題があり、一般的には屋外設置に適していないと考えられます。そこで独自のデジタル検出方式を考案し、低コスト/省スペースでかつ屋外設置を踏まえた静電容量方式の水位計を実現しました。

本稿では治水システムの社会実装に向けた検討と水位計の開発について報告いたします。

## 2. 水位計の普及を目指す水域

災害の影響は脆弱なところに集中するといわれるように、水害もまた財政難や人口流出が起きている地方都市に集中することが予想され、用水路や小川の氾濫、溪流沿いで土砂崩れ、ため池の決壊などの増加するリスクに対処するために新しい治水システムが求められています。しかしながらそれらの水域は広範囲かつ管轄体が多岐にわたるため、横断型のシステムの普及を妨げてきました。水域の分類を以下に示します(表 1)。

表 1. 水域の分類

水域	一級河川 二級河川	水田	用水路、ため池	小川、溪流
管理者	国交省、都道府県	農家	農家、農協、自治体	市町村、自治体
治水 システムの価格	百万円～	数万円～	数千～1万円	
システムの範囲	河川沿い	個々の農家	広い範囲(山岳、無人エリア) 無数の設置個所	

水域によって治水システムに許容できるコストが異なります。国交省や都道府県が管理する大規模な水域では、水害の経済的損失の規模が大きくかつ歴史的な被害の記録が残りやすいため、それだけ社会的な重要度が高く、コストを掛けてシステムを構築するモチベーションが生まれます。設計思想はコスト削減のために仕様を突き詰めるより、想定外の災害に対応できるようにロバスト性を持たせるのが好ましいと考えられます。また土木工事で整備された河川は規格化が可能であり、あらかじめ想定される範疇にデバイスの設置状態や設置方法を収めることが出来ます。

一方で上記の設計思想は小規模な流域に適応しづらいと考えられます。普及を後押しさせる費用対効果については大規模流域と比べて被害額は小さく、リスク試算の方法も一律ではないことから見出しづらいものになっています。さらに被災総額的な観点だけではなく、災害に脆弱な状態にあることが資本の流入を阻害し機会損失につながることも考えられるなど、地方社会が累積していく負担は計り知れない面があります。また地方都市で割合の大きい第一産業は水資源と深いかわりがあり、古くから水利権をめぐる行政との抗争の名残から自治の文化が強く、公的な機能が入りこみにくいといわれます。このように管理体各々に自治がゆだねられる一方で、水域を横断する包括的な治水でないという意味をなさないという構図があります。<sup>4)</sup>

従来の設計思想では技術的な困難も生じます。当然のことながら小規模な水域であるほど人工物が少なくなるため設置環境が定まらなくなります。電源確保や通信インフラ環境などの個々の事情も相まって、状況に応じた設計仕様の柔軟性に重きを置く必要が出てきます。また河川は合流していくため、治水に必要とされる水位計の数は上流に位置するほど必然的に増えることから低コストであることが重要視されます。上記にある管轄体の多様性からシステムの普及タイミングが一樣にならないことが考えられ、ノード数の逐次増減を想定しなければなりません。よってあらかじめ決められたリソースを前提に、システムを設計する手法は不都合が生じやすいという欠点があります。これらの観点から小規模水域における治水システムの普及には、実証実験が近年盛んになってきている IoT が適していると考えられます。IoT の土台になっているオープンソースやクラウドコンピューティングの普及により、ソフトウエ

アのみならずハードウェアのコンポーネント化が進みシステム設計を高い抽象度で行えるようになりました。高いスケーラビリティを兼ねそろえつつ迅速なシステム展開が可能で、仮説検証サイクルの高速化が起きています。それ故仕様の変更が比較的容易で、システム設計の柔軟性を高めることができます。コンポーネント化は低コスト化にも寄与します。例えば、治水システムに必要な通信モジュールはその他の IoT システムにも適用できることから、特定のアプリケーションに縛られないスケールメリットが働きます。高いスケーラビリティは小規模からの仮説検証に効果を発揮します。必要最小限のリソースで初期投資のリスクを最小化し、資本投入に関する事前検討の負荷も軽減できます。つまり拡大して回収に入るフェーズまたは縮小および撤退時も、システムの差異を意識せずにスケールを調整できることから、検証結果が出た後への判断に主軸を移すことができます。

私たちは、上記の普及に関する課題と技術的な課題に対処する糸口として、長野県茅野市および公立諏訪東京理科大学(以下、諏訪理科大)との枠組みを活用しています(表 2)。茅野市中心部は諏訪盆地に位置しており、近隣に位置する諏訪湖への流入河川が張り巡らされています。諏訪理科大は IoT の無線通信規格 LPWA(Low Power Wide Area)の技術に強みを持っており、茅野市と連携して市役所管轄の水域におけるシステムの運用実績を積み上げております。実績が次なる導入を生むという呼び水的な機能を果たすだけでなく、非営利的な大学の研究の一環であることから、課題となっていた横断的なシステム普及への理解が得やすいことが期待されます。一方で新しい取り組みでもあることから、システムの技術的な発展の余地が残されており、水位計に関しては IoT システムに見合った低コストで仕様の柔軟性に富んだデバイスがもとめられています。

表 2. 産学公連携の枠組み

プレーヤー	治水システムを普及させる上での課題	産学公連携の強み
長野県茅野市	設置数の確保	茅野市管轄の水域内 47 か所運用中
公立諏訪東京理科大学	IoT 無線通信技術 利権者の理解・心理的側面	諏訪理科大のシーズ 大学の研究、茅野市のサポート
日本航空電子工業	最適な水位計 (コスト・耐候性・消費電力)	企業が持つ技術シーズの活用

課題が多いことは参入障壁の高さでもあります。社会実装のようなテーマは対処すべき課題のスコープが広いため、各々の違う分野での強みを生かせる枠組みの利点が競争的優位性につながる可能性があります。私たちはメーカーとしての強みである技術的課題の解決に集中し、治水システムの普及による社会課題解決に寄与できると考えています。以下に、小規模流域の治水システムにまつわる性質をもとに求められる特性を考え、水位計の方式の検討、デバイスの設計及び評価を行いました。

### 3. 検出方式の検討

小規模水域の治水システムは、設置方法をはじめとした種々雑多な状況に対応できる仕様の柔軟性、低コスト、ユーザビリティが求められています。それをもとに水位計の方式の検討を行いました。<sup>5,6)</sup>表3に検出方式の比較を示します。第一に超音波方式があげられます。これには設置箇所が限られる課題があり、反射波をとらえる必要があるため、水面に対して水平かつ冠水しない程度の距離を保つ箇所に設置する必要があります。またセンサ自体は結露に弱く、排水などに混ざるような油脂の被膜に弱いという欠点があります。加えて泡や波に反射波が散乱されてしまうため、水面の状態も意識しなければなりません。音速に依存するため、分解能を上げようとすると制御・演算回路のコストも上昇します。河川の水位測定でよく用いられる圧力式についてはコストの問題があります。圧力を測るセンサ部分は外力に対して極めて繊細であるため、堅牢なパッケージングが必要でありコスト上昇とともに小型化にも制約が生じます。四季問わず水位観測する必要がありますが、凍結により圧力センサ部が損傷を受けるという欠点もあります。耐雷性に優れた方式として光ファイバを利用した水位計もあります。光ファイバの歪により生じる透過・反射光のスペクトルや位相の変化を計測して水位を求めます。水圧による光ファイバの変形を計測するので、圧力タイプと同じ欠点がある他、光学部品や測定機器のコストが高いことがあげられます。<sup>7,8)</sup>屋内下水道設備などの水位検出にはフロート式がよく用いられます。機械的な堅牢性が高く汚染物の付着にも強い長所があります。一方で浮きが自由に動けるだけの高さや幅が必要となり、また連続的な水位の変化をセンシングするには不向きです。

静電容量式は工場タンクなどでよく用いられますが、外乱の影響を受けやすく屋外設置には不向きとされています。静電容量は、検出する液体固有の性質や温度など様々な要因で変化するためです。それを積極的に活用した応用例としては有機質液体の濃度計測があげられます。<sup>9)</sup>この他にも、コロイド分散系が静電容量の周波数依存性に与える影響<sup>10)</sup>、水が持つ静電容量の温度依存性などの外乱要因があげられます。この変数をキャンセルする手法として、リファレンス電極を用いた感度補正が行われます。<sup>11)</sup>ただし、リファレンス電極が冠水していることが前提であり、リファレンス部に対する付着物や沈殿物が全体の計測値に影響を与えてしまう欠点があります。加えて検出水位レンジを拡大していくと、リファレンス部とセンサ部の容量差が大きくなるため、静電容量計測回路には高いダイナミックレンジとリニアリティが求められます。これは仕様の自由度を阻害する要因となり、回路設計の高コスト化にもつながります。しかしながら各種方法と比較するとこの方式はセンサエレメントの設計の自由度が高く、低コストに実現でき、IoTの回路を含めた全体のシステムもコンパクトである特長を有しています。

12,13,14,15)

表 3. 水位センサの方式の比較

原理	仕様の柔軟性	コスト	堅牢性
超音波式	設置方法が難しい	分解能に依存	結露に弱い
圧力式	かさばるパッケージング	量産に不向き	凍結に弱い
光学式	設置方法	高い光学部品	耐雷性、耐薬品性✓
フロート式	分解能が低い	ブロー成形 ✓	汚れや付着物に強い ✓
静電容量式	薄くて軽い、任意の形状と設置方法 ✓	プリント基板製造プロセスの転用が可能 ✓	機械的衝撃に強い ✓

## 4. 水位計の原理

上記の静電容量式の課題に対して、本稿ではアナログ的に容量の二値比較を行い、デジタル値として水位を換算することで静電容量検出回路の動作域を絞り、誘電率の変動に強い検出方法を考案しました。図 1 に検出の仕組みを示します。

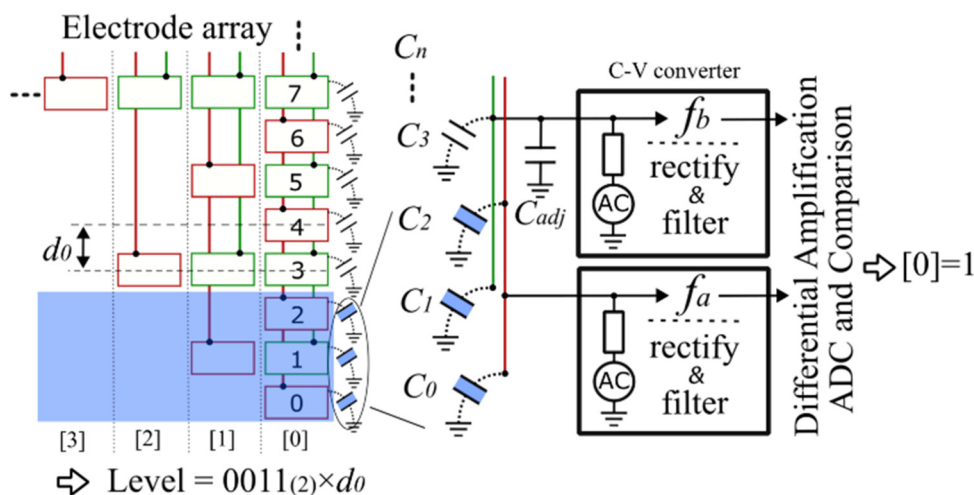


図 1. JAE 水位の原理

電極に誘電体が触れることによって変化する電極対グラウンド間の静電容量の変化から、液面レベルを検出します。電極は列状に配置されており、電極間隔は列に割り当てられたビット桁に対応しています。[0]列の電極間隔 $d_0$ は水位計の最小分解能であり、二進数カウントに対応するので[1]と[2]の電極間隔はそれぞれ $2d_0$ 、 $4d_0$ になります。また列ごとに奇数番目と偶数番目に交互配置された電極ペアが存在します(赤と緑)。液面レベルに応じて電極ペアの容量の大小関係が交互に切り替わり、それをビット値としてカウントし、 $d_0$ をかけることで液面レベルが算出できます。

微小信号の二値比較においては閾値のずれが致命的です。本稿では電極ペアの容量を電圧変換し、作動増幅後にデジタル値上で二値判別を行います。そのことにより柔軟に閾値を設定することができます。図 1 ではビット桁[0]の電極列を選択した際の様子を示しています。2 番目の電極まで冠水しており、偶

数と奇数の電極ペアの容量の大小関係は以下の式 1 のようになっています。

$$-C_{adj} + \sum_{i=0}^{\frac{n-1}{2}} C_{2i} - C_{2i+1} = C_2 - C_3 - C_{adj} > 0 \quad \text{式 1}$$

調整容量 $C_{adj}$ によって奇数側に適切なバイアスを加えることで電極ペアの容量差を設け、閾値判別の確実性を上げます。ここで回路の動作条件について述べます。容量電圧変換回路の出力をそれぞれ $f_a$ 、 $f_b$ 、 $n$  番目の電極容量を $C_n$ とすると、電極ペアの容量差 $C_{n+1} - C_n = \Delta C$ が全体の検出レンジに対して十分に小さい場合には一次近似を用いることができるので、 $n$  番目電極に水位が到達している際の容量差分出力 $\Delta f$ は以下のように表されます。

$$\Delta f = f_b - f_a = f'(C_n)\Delta C \quad \text{式 2}$$

容量差出力 $\Delta f$ が回路の電圧ノイズ $V_n$ よりも大きければ比較可能であり、また $\Delta C > 0$ が成り立つとすると回路の動作条件は、

$$f'(C_n) > V_n \quad \text{式 3}$$

となります。よって式 3 を満たす限り検出体の誘電率変動と回路の非線形性を許容できます。

デジタル式のレベル検出には、多数の検出電極から引き出す配線数の増大が課題です。レンジの拡大と分解能の増大に伴い配線数が増大し、寄生容量の増大や配線スペースの確保が難しくなるためです。タッチパネルに用いられる行列による電極の選択方式が一般的に考えられ、正方行列である場合、電極の総数を $n$ とすると $2\sqrt{n}$ 本の配線が必要です。一方で本稿の検出方式では、二進数カウントのビット桁に対応する電極列ごとに比較ペア分の配線で済み、エレメントから回路への配線の総数は $2\log_2 n$ 本になります。特に数百以上の電極が必要とされるケースにおいて配線数削減効果が高くなり、センサエレメントの設計の自由度が増すことが期待できます。

## 5. 水位計の設計

### <5.1 回路の設計>

当社の加速度計において、慣性力を受けて歪む可動部と固定端の間の微小な容量変化を検出するのに用いられている静電容量検出回路を、水位計の回路設計に応用いたしました。回路の入力段にはセンサ容量と等価回路的にローパスフィルタを形成するための直列抵抗、減衰させる対象の搬送波の交流電圧源が接続されています(図 2)。センサ部分は二つ用意されており、相互の信号値の相対的な差を差動増幅することで、容量のオフセットをキャンセルします。ここで片方のセンサ容量が変化するとカットオフ周波数が変化するため、搬送波の減衰量が変化し信号が表れます。入力段ローパスフィルタ後の信号を整流し直流に直したのちに、再度ローパスフィルタにかけて差動増幅します。この構成を水位計に適用す

るとセンサ部分が一番大きな容量成分になりますが、入力段の直列抵抗により分離されるので搬送波の容量性負荷駆動の負担が少ない利点があります。

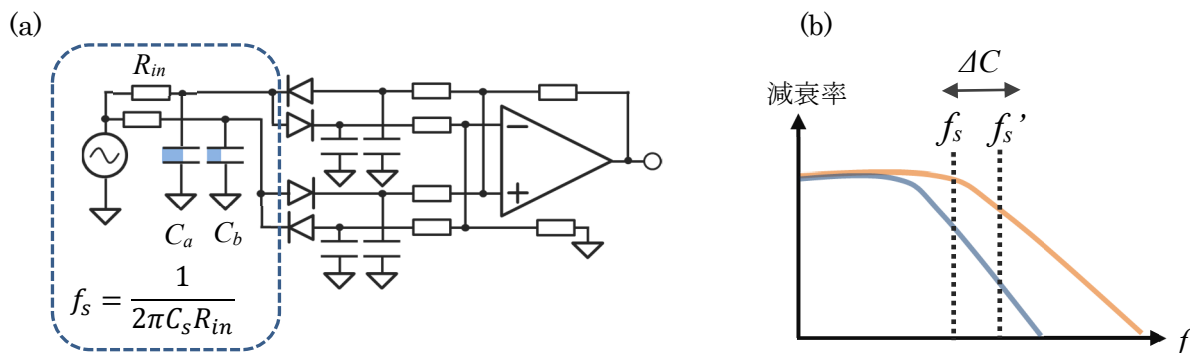


図 2. 静電容量検出回路

(a) 検出回路、(b) 検出の原理

### <5.2 センサエレメント>

本稿の水位計は接触式であるため、センサエレメント部だけを交換できるような形態が望ましいと考えられます。そこで設計時の自由さを損なわず、かつ低コストで実現するために PCB(Printed Circuit Board)でセンサエレメントの作製を行いました(図 3)。感度面で有利な自己容量方式を採用し、センサエレメントを含めた省スペース化を図っています。外部シールドパイプは設置の際に地面に打ち込まれアースがとられており、シールドとセンサ電極部間の容量を測る構造になっています。誘電体がシールドとセンサ間を埋めない限り大きな静電容量の変化を生まないため、付着物の影響を低減させることができます。センサ電極と検出回路までの配線は検出する誘電体との容量結合を避けるため、一層目のベタパターン(シールド)の下部で取り廻します。ベタパターンと配線の容量が生じてしまいますが、これは外部環境にほぼ依存しない定数として扱えるので、容量のオフセット調整で容易に取り除けます。またはアクティブシールドを用いると、電極と同電位になるため図 3 のように基板の導体間では電界が生じず容量結合の影響を低減できます。エレメント表面には PCB の吸水と電極の電気分解を防ぐためのコーティングが施されています。

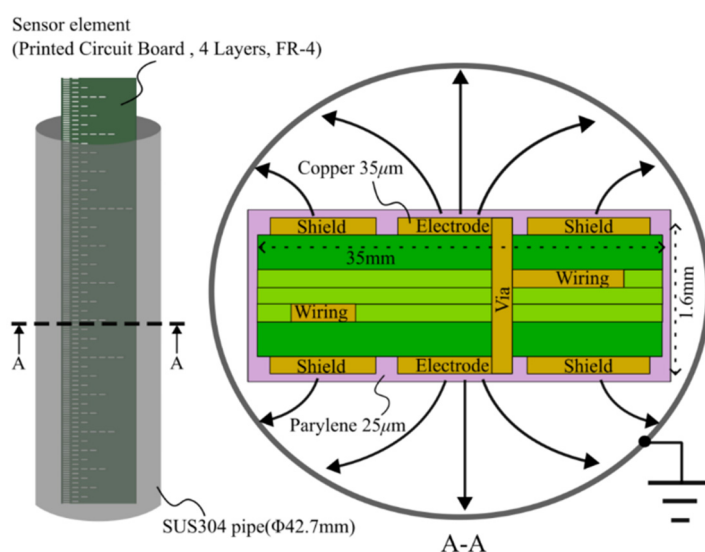


図 3. センサエレメントと断面図

### ＜5.3 水位計の構成＞

スマートセンサにはセンサの性能だけではなく、低コストであることをはじめ、省スペース、設置の柔軟性、コネクティビティ、疎結合、省電力などの総合的な仕様が要求されます。図 4 に回路構成を示します。

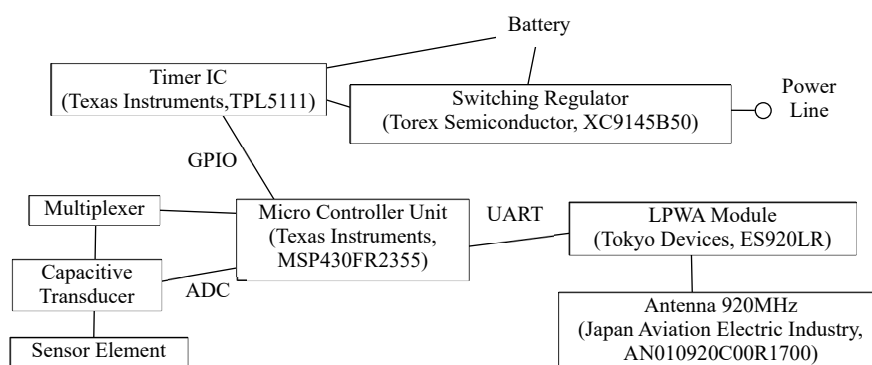


図 4. 水位計の回路機能のブロック

電源回路、無線送信系、制御回路、検出回路、センサエレメントすべてを PCB で完結させています。1 分ごとの間欠動作の場合単三電池 2 本で約 5 年の駆動が可能であり、薄型化も容易です。FPC(Flexible Printed Circuits)で作製すれば曲面に設置することができます。センサエレメントの検出範囲の変更、シールドの有無、電極幅の変更に対して、従来法では感度調整なども追加が必要になりますが、独自の検出手法により検出回路側はオフセットの調整のみで済む仕組みになっています。IoT デバイスを設計するうえで最も重要な低消費電力性は、タイマ IC による電源間欠動作により実現しています。加えて、LPWA(Low Power Wide Area)モジュールや MCU(Micro Controller Unit)においても低消費電力性を重視した構成となっており、動作時の消費電力を抑えています。災害用途では非常事態時のみに動作

して水位を検出し、通常時はほぼスリープする用途が想定されるため、以下のフローチャートの動作を実現するタイマ機構となっています(図 5)。

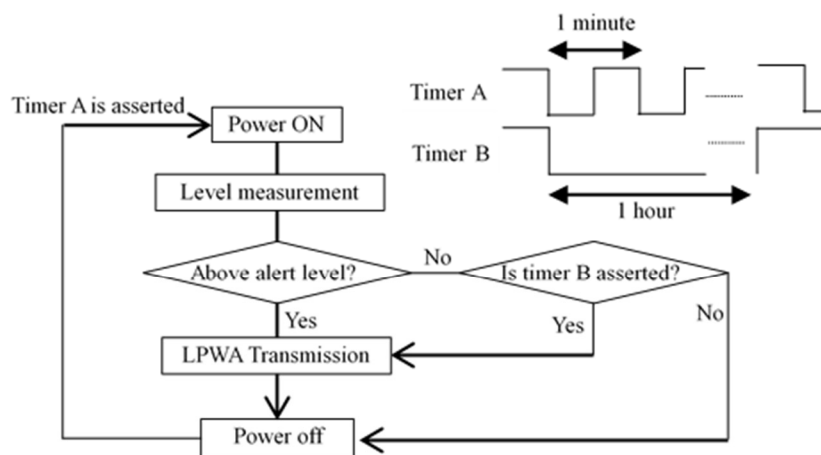


図 5. フローチャート

## 6. 計測

式 3 より最低動作条件が与えられていますが、実際には回路特性の非対称性やセンサエレメントの寄生容量がセンサ動作に影響を及ぼします。そこで上記の影響を含めた上で、検出体の静電容量の変動からの影響を実測するべく、誘電率の異なる液体の液面レベルの測定を行いました。

### <6.1 動作確認>

評価系の様子を図 6 に示します。

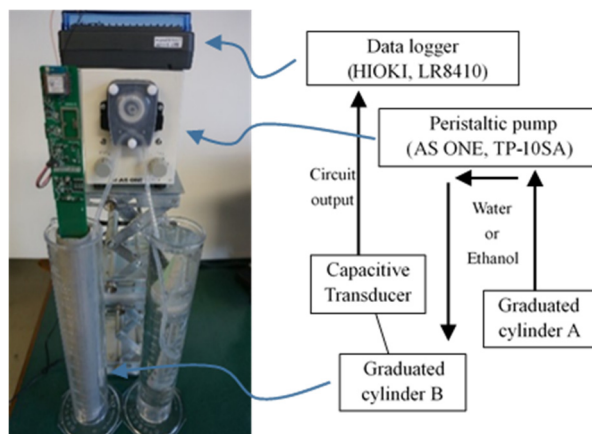


図 6. 測定系

メスシリンダ B 内にセンサエレメントを収めたステンレスパイプを入れ、チューブポンプ(HIOKI, LR8410)を用いて毎分約 170 ml のペースで液体をシリンダ A から B に輸送しました。液体には純水およびエタノール 99.5 %を用いました。本水位計は閾値判別ができれば動作するため(図 1)、閾値判別をする対象である二対の容量電圧変換回路出力を作動増幅したアナログ電圧出力を、データロガーで計測しました。

## <6.2 実験結果>

図 7 に閾値判別前の容量検出回路出力を示します。

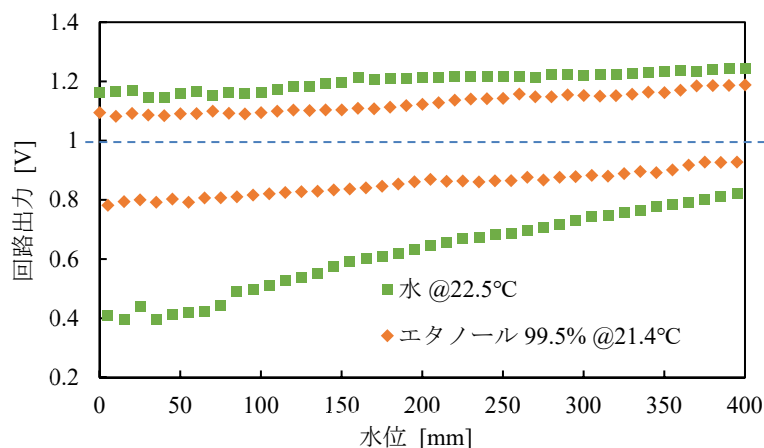


図 7. 容量検出回路出力

図 7 では、液面の高さに応じてプロット群の上部と下部が閾値(1 V)を順番に交差していることから、デジタル的な閾値判別が可能であることがわかります。また実験温度でのエタノールの比誘電率は約 25 であり、水の比誘電率の温度依存性(0~90°C で約 85~57)が課題となる自然環境においても動作可能と考えられます。参考値として用いている容量検出回路出力のノイズレベルは 9.48 mVrms(Bandwidth:15 kHz, 50 ksps)であり、この回路ノイズと閾値の設定幅(0.926~1.08 V)との比をとった結果、16.3 と十分に高い値が得られました。感度と誘電率が比例すると仮定した場合、最低で比誘電率が 1.56 の液体まで検出することが出来るという結果が得られました。

## <6.3 実地試験>

諏訪理科大と長野県茅野市の協力を得て、フィールド設置による実証実験を行いました。センサデータをクラウドにアップロードする IoT システムは、諏訪理科大に提供していただいた ELTRES(ソニーネットワークコミュニケーションズが開発した LPWA 無線通信規格)の通信インフラを活用しています。

図 4 の水位計のシステムには無線通信系を統合していますが、MCU を中心にインターフェースを柔軟に切り替えることができるので、単独でも、または既存のシステムに組み込んで使うこともできます。

図 8 に実験系の様子を示します。ELTRES の IoT システムと水位計のインターフェースは UART を用いています。ステンレスパイプは川底に打ち込み水位計を固定し、当社の水位計の比較対象として市販の圧力式水位計を同時に設置しています。水位データを 3 分おきにサンプリングし、51 日間の計測を行いました。

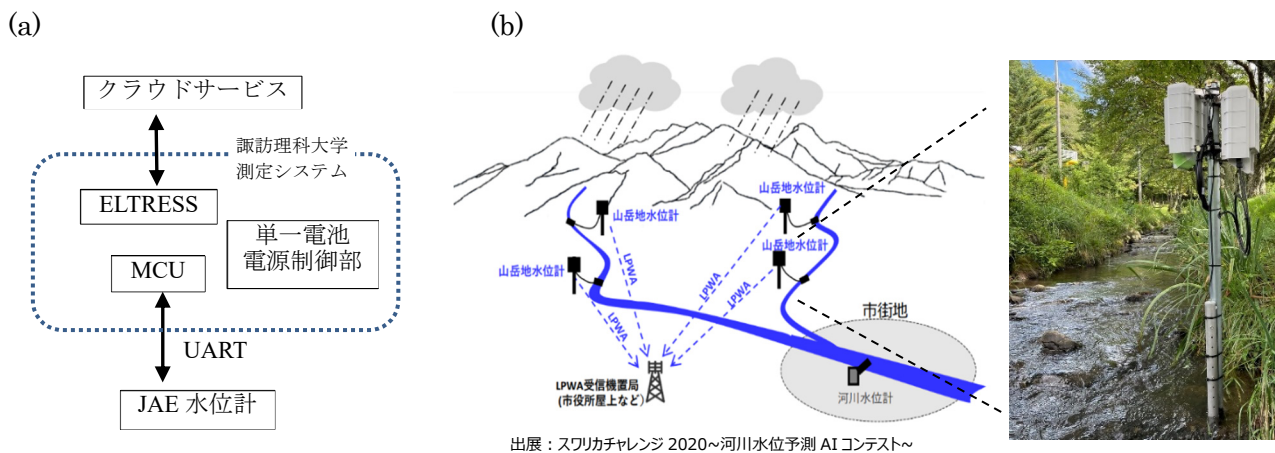


図 8. 実地試験の計測システム

(a) ブロック図、(b) システムの概要

#### <6.4 実地試験結果・考察>

以下に 2022/9/1 0:01 から 2022/9/4 12:00 までの計測データを示します(図 9)。急激に水位が上昇している箇所は秋雨前線による集中降雨があった時刻です。急峻な水位の上下に対して市販の水位計と同様に追従するデータが得られました。これにより、濁流や漂流物が想定されるような状況においても、接触式の静電容量型水位計が使用できていることが確認できました。

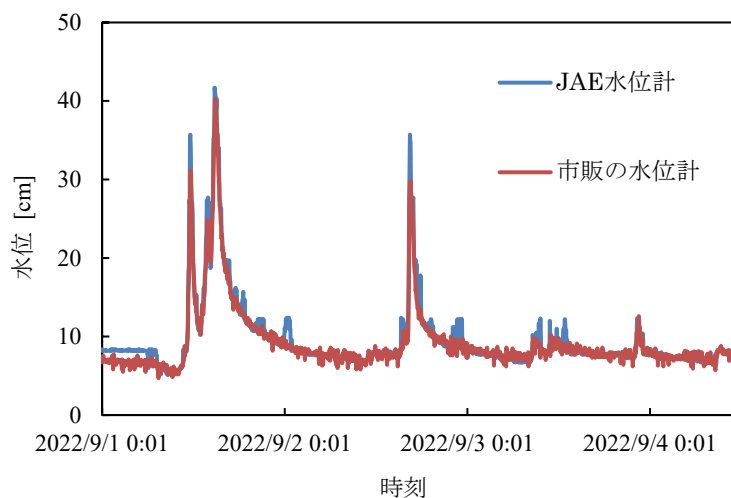


図 9. 実地試験時の水位計出力

小川の水位測定には致命的ではないものの、グリッジのようなセンサ出力が表れていることが読み取れます。この傾向を定量化するために、当社水位計と市販水位計の全データ区間(51 日)の出力差分のヒストグラムをとりました(図 10)。誤差の  $1\sigma$  は 1.2 cm ですが、市販と当社の水位センサの設置位置が数センチ程度離れていることから、川の水位のばらつきを考慮すると妥当な範囲であると考えられ、センサ出力の正常な範囲を正規分布で示しています。

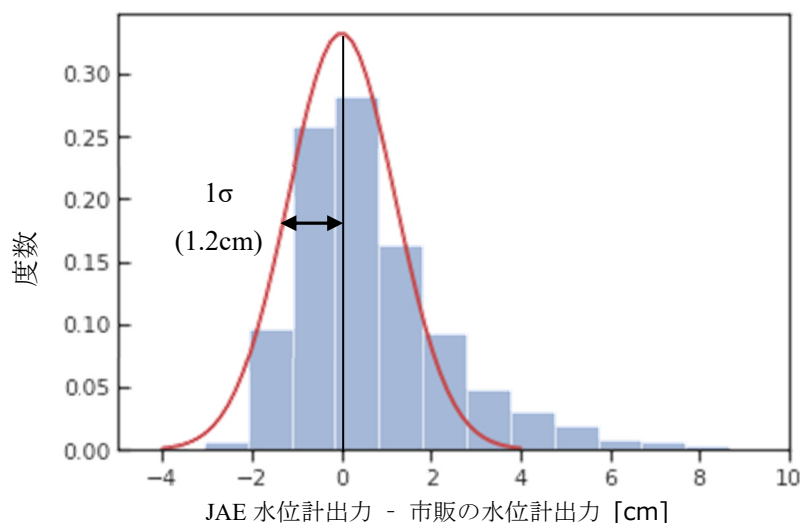


図 10. 出力差のヒストグラム

一方で全区間データにおいても上に触れるグリッジが表れる傾向が見られます。これについては、デジタル値として水位を読み取っていることに起因しているのではないかと考えられます。デジタル値での読み取りは誘電率の変化や付着物その他の外乱要素に耐性を持たせる意味がありますが、水位は連続値として変化するので読み取り閾値近辺では値がバタついてしまいます。他の原因として、図 1 のように検出するビット電極の位置が離れている場合、読み取り回路の特性やエレメントの寄生容量が変わるため、ビット桁ごとに水位の読み取り閾値がばらつくことが考えられます。これに加えて水流が強い場所では、水位の傾きが電極列ごとの水の浸かりやすさに影響する可能性があります。上記の課題に対しては、電極列を一つにまとめて読み出す工夫、毛細管現象を利用して中途半端な水の電極への接触をさせない工夫、複数センサの値を利用しデジタルデータ上で異常値をはじく対処法などが考えられます。

## 7. まとめ

本稿では、山間部の地方都市が抱える小規模水域の氾濫や土砂災害のリスクに対し、IoT を使った小規模・多数・広範囲という特性を有する治水システムの実現に向け、当社の加速度計の静電容量センシング技術を応用した静電容量型水位計の開発取り組みをご紹介しました。静電容量の二値比較を利用したデジタル式検出方法を採用することで、外乱の影響を受けにくいセンシングを実現し、濁流や漂流物が想定されるようなケースにおいても水位計が長期間機能することを実証できました。

今回の開発においては、産学公連携の枠組みを生かし従来システムの普及に関する課題と技術的な課題の両方にアプローチする道筋を示しました。今後、概念実証を継続し、蓄積されたデータの利活用について様々な自治体、企業と検討し防災分野への更なる貢献を目指していきます。

### 【謝辞】

本開発において水位計の評価に多大なご協力をいただきました公立諏訪東京理科大学の小林誠司特任教授に深く感謝申し上げます。

## [参考文献]

- 1) United Nations Department of Economic and Social Affairs, “Goals 13 Take urgent action to combat climate change and its impacts”, <https://sdgs.un.org/goals/goal13> (2023/2/13)
- 2) 国土交通省, “流域治水の推進について”, 住民自らの行動に結びつく水害・土砂災害ハザード・リスク情報共有プロジェクト第6回全体会議,  
[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/hazard\\_risk/dai06kai/dai06kai\\_sankosiry003.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/hazard_risk/dai06kai/dai06kai_sankosiry003.pdf), p3-13 (2023/1/18)
- 3) 三好規正, “気候変動時代における実効的な流域治水と自治体の役割”, 自治総研通巻 519 号 1 月号 (2022)
- 4) 島谷幸宏, 山下三平, 渡辺亮一, 山下輝和, 角銅久美子, “治水・環境のための流域治水をいかに進めるか?”, 河川技術論文集, **16**, p17-19 (2010)
- 5) Konstantinos Loizou, Eftichios Koutroulis, “Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system”, *Measurement*, **89**, 204-214 (2016)
- 6) Yadendra Singh, Sanjeev Kumar Raghuvanshi, Soubir Kumar, “Review on Liquid-level Measurement and Level Transmitter Using Conventional and Optical Techniques”, *IETE Technical Review*, **36**, 329-340 (2018)
- 7) Weimin Lou, Debao Chen, Changyu Shen, Yanfang Lu, Huanan Liu, Jian Wei, “An optical liquid level sensor based on core-offset fusion splicing method using polarization-maintaining fiber”, *Journal of Physics: Conference Series* **680**, 2-3 (2016)
- 8) Xipu Zhang, Wei Peng, Zigeng Liu, Zhenfeng Gong, “Fiber Optic Liquid Level Sensor Based on Integration of Lever Principle and Optical Interferometry”, *IEEE Photonics Journal*, **6**, 3-5 (2014)
- 9) 新井 智一, 一条 文二郎, “液体用静電容量形濃度計”, *電気学会雑誌*, **80**, 947-953 (1960)
- 10) 花井哲也, “コロイド分散系に見られるさまざまな誘電挙動”, *表面科学*, **12**, 14-21 (1991)
- 11) Texas Instruments Application Report, “Capacitive Sensing: Out-of-Phase Liquid Level Technique”, January (2015)
- 12) Pavel Kulha, Wolfgang Hilber, Alexandr Laposa, Bernhard Jakoby, “Screen printed and laminated electrodes for low-cost capacitive level measurement systems”, *Journal of Electrical Engineering*, **69**, 177-182 (2018)
- 13) Konstantinos Loizou, Eftichios Koutroulis, “A Low-cost Capacitive Sensor for Water Level Monitoring in Large-Scale Storage Tanks”, 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology, 1416-1421 (2015)
- 14) J. L. Mazher Iqbal, Munagapati Siva Kishore, Arulkumaran Ganeshan, G. Narayan, “Design and Implementation of SOC-Based Noncontact-Type Level Sensing for Conductive and Nonconductive Liquids”, *Advances in Materials Science and Engineering*, **2021**, 1-12 (2021)
- 15) Tarikul Islam, Om Prakash Maurya, Anwar Ulla Khan, “Design and Fabrication of Fringing Field Capacitive Sensor for Non-Contact Liquid Level Measurement”, *IEEE Sensors Journal*, **21**, 24812 (2021)