

# 共通の汎用マイコンを用いた静電容量および 反射時間計測による測定深度選択可能な水位計

繁田 亮<sup>1,a)</sup> 鈴木 康大<sup>1</sup> 川原 圭博<sup>1</sup>

受付日 2018年12月25日, 採録日 2019年7月3日

**概要:** 農業において, 水管理は収量や品質を左右する重要な要素であり, 水稲栽培では水田水位の維持管理だけでも多くの人的コストを要することから, 管理の効率化は生産性向上に直結する. こうした背景のもと, 様々な水田水位計が提案されてきた. しかし, 水位計には, 水田に限らず農業・防災分野で広くニーズがあり, 要求される測定レンジや精度も多様なので, 可能な限り共通化した測定・制御回路を利用しつつも, 測定深度を容易に変更可能とし, 各種ニーズに応えられる水位計を構築することが望ましい. そこで本研究では, 汎用マイコン内蔵のモジュールを用いて静電容量式と簡易型の Time Domain Reflectometry (TDR) 方式の両方を利用できる水田水位計を開発した. さらに, 多様なニーズに応えるため, TDR 方式では, 通信ケーブルをプローブとして使用し, 測定パラメータを動的に調整するようにして, 測定深度の変更を容易にした. これらの手法の使い分けにより, 0~1m の範囲では 1~5cm 程度, 1~10m の範囲でも平均で 10cm 以下の誤差で水位の計測ができた. また静電容量式の水田水位計は実際に水田に設置し, 水分の変動量を測定して, 営農上有益な情報が得られた.

**キーワード:** 水位計, 精密農業, ワイヤレスセンサネットワーク, Time Domain Reflectometry

## Measurement Depth Selectable Water Level Sensor Using Capacitance and Reflection Time Measurement

RYO SHIGETA<sup>1,a)</sup> KOUTA SUZUKI<sup>1</sup> YOSHIHIRO KAWAHARA<sup>1</sup>

Received: December 25, 2018, Accepted: July 3, 2019

**Abstract:** Irrigation management is crucial factor in agriculture as it affects to yield and quality of crop. Particularly, water level control in paddy fields requires huge labor cost so improving the management process contributes to improve farming productivity. Therefore, several water level sensors specially designed for paddy fields are commercialized. On the other hand, there are various needs on such low-cost water level sensor and required spec depends on its purpose. Thus, a water level sensor which can adapt to various purposes but has shared measurement and control circuits is desired. We developed a water level sensor that uses the constant current module included by a cheap MCU for both capacitance measurement and time domain reflectometry (TDR). In TDR method, parallel wire transmission line is used as a probe and adaptive threshold contributes to change measurement range easily. Combining these 2 measurement methods, we achieved less than 5cm and 10cm accuracy in 0 to 1m and in 1 to 10m respectively. The capacitive one tested in paddy fields and we retrieved valuable information to optimized water management.

**Keywords:** water level sensor, precision agriculture, wireless sensor networks, time domain reflectometry

### 1. はじめに

近年, 農業分野における, Internet of Things (IoT) 技術の導入への期待が高まっている. 特にワイヤレスセンサネットワークと, インターネット経由で操作可能な灌水装

<sup>1</sup> 東京大学  
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 116-8656, Japan  
<sup>a)</sup> shigeta@agk.t.u-tokyo.ac.jp

置などの制御装置との連携は省力化・最適化を通して農業生産性の向上に資すると考えられている。我が国の農業において、水稻栽培は依然として重要な位置を占めるが、農業従事者の高齢化にともない、その効率化は急務である。農地が集約されれば、大規模機械化により効率的な栽培が可能になると期待されていたが、規模拡大が後継者の不在などで散発的に手放された農地を買収することで進行した結果、農地が分散し、効率化は進まず、管理コストの増大が問題となっている。

こうしたニーズから、水田水位計および遠隔操作可能な取水装置が開発されつつある。水田水位測定は、測定レンジは0~20 cm程度と非常に狭い一方で、きわめて浅い深度でセンチメートル単位の精度が要求されるため、水田水位の計測に特化したソリューションになりがちである。結果として、広く水田に配置するには高コストで、実用面での課題が依然として残されている。水位計は水田に限らず、農業・防災で広く用途があり、要求される仕様も様々である。たとえば、河川や湖沼の水位のモニタリング、井戸の水位（地下水位）の測定などでは、季節や降雨により、数m単位の変動幅が予想され、測定レンジは数から十数メートル程度まで確保するのが望ましいが、防災情報としては、センチメートル単位の精度は必ずしも要求されず、水位ゼロに近い領域での測定も重要ではない。そこで、これらの水位測定の多様なニーズに柔軟に対応できるプラットフォームを整備することができれば、量産効果によって低価格が進み、普及に弾みがつくと考える。しかし、一般に測定手法に応じて得意とする測定レンジが異なるため、共通化は難しかった。

水田のような比較的浅く、測定レンジが広くない場合は、超音波方式または静電容量方式が主流である。超音波方式は非接触で測定できるため、耐久性に優れ、水田の水位管理に十分な精度も有する [1], [2], [3]。しかし、障害物に弱いため、作物や浮遊物から影響を受けないように場所を確保する必要がある。静電容量式はタッチデバイス用の静電容量測定モジュールが普及していることもあり、低価格に実装できるようになってきた [4]。耐久性と精度にも優れ、超音波方式のように障害物からの影響も受けにくい。一方で、静電容量方式では、水田の水質によって電解度などが異なり、同じ水位であっても異なる静電容量が計測されることがあるため、水質に応じた校正が必要であるという難点があった。そのため、従来は設置前に水位の高さと静電容量を対応させる校正作業が必要だったが、Chetpattananondhらは校正用の基準電極を設置することで、事前に校正することなく水位の計測を可能にした [5]。

一方で、数メートル単位の変動が予想される場合によく用いられるのが水圧式である [6]。水圧式は水面付近における気圧と底面での水圧の差を測定することによって水位を推定する方法で、十分な水圧差が得られる深度では有効

であるが、機械部品が多く、消費電力や耐久性に懸念が残る。また、Time Domain Reflectometry (TDR) 方式は電気信号の反射を時間領域で解析することで、伝送路の状態を測定する方法で、水位に応じて伝送路としての特性が変化するプローブを用いて測定を行う。プローブの形状としては、二本の金属棒による並行二線型伝送路、細い金属棒を金属の筒の中に配した同軸型伝送路などが提案されている [7], [8], [9], [10], [11]。TDR方式では、高周波測定機器が必要となるため、測定装置が高価なのが難点であったが、静電容量測定を用いた時間測定で簡易的に実現することができるようになった [12]。また通信用のケーブルをプローブとして利用することで測定深度が容易に変更できるため [13]、十数メートルまでの比較的広い測定レンジで利用可能であると期待される。ただし、専用のプローブに比べて、伝送路としての特性が安定しないため、固定の測定パラメーターでの測定では広いレンジでの測定は困難であった。

一般的に方式が違えば、測定回路が大きく異なるため、複数の方式を用いて測定レンジの拡大を図ろうとしても、別々に測定回路を用意する必要があり、共通の測定回路で測定レンジに応じた測定方式の使い分けができる水位計は実装に至っていない。しかし、静電容量式と簡易的なTDR式ではどちらも同じ汎用マイコンの定電流モジュールを利用した静電容量測定を利用しているので、この2つの方式については、簡易TDR用の反射波検出回路を除けば、測定・制御回路についても共通化できる。反射波検出回路は数百円程度で実装できるため、追加しても大きなコスト増加要因にはならない。そこで、汎用マイコンを用いた静電容量測定と簡易TDRを用いて、様々な用途に対応可能な水位計を開発した。このシステムでは、静電容量式水位計を用いて、水田水位のモニタリングが可能である。さらには同じマイコンと平行二線を用いた簡易TDR測定を導入することによって、地下水位・河川や湖沼の水位観測といった環境モニタリングへと応用範囲を拡大できる。また、様々な測定レンジに対応するため、可変抵抗を利用して反射波検出の閾値を変更できるようにした。これにより、水田水位などを想定した30 cm以下の測定レンジでは静電容量方式が、河川水位などを想定した1~10 m程度の測定レンジでは簡易TDR方式が有効に機能することが確認された。

本論文の構成は以下のとおりである。2章で、水田水位のモニタリングを目的とした静電容量方式による自己校正可能な水位計の設計を述べる。そして、3章で水田以外の水位測定のニーズに広くこたえるための平行二線と簡易TDR方式による水位計の設計を述べ、4章で今後の課題にふれつつまとめとする。

## 2. 自己校正可能な静電容量式水位計

静電容量測定がタッチパネルなどで広く使われるようになり、汎用マイコンでも容易に測定可能になってきた。そうした汎用部品を利用した静電容量測定は、水位の測定に用いることができる。一部の PIC マイコンに内蔵されている Charge Time Measurement Unit (CTMU) は定電流源として機能させることができ、静電容量測定をはじめ様々な用途で利用可能である。CTMU を用いることで、単一のマイコンチップで制御・測定が完了し、測定用回路を別途用意する必要がないため、製造コストを抑えることができる。また、充電時間も回路変更なく  $\mu\text{s}$  単位で調整可能なため、センシングパラメータの調整も容易である。そこで、CTMU を内蔵する PIC24FJ64GB002 を使用して静電容量測定を行うこととした。静電容量測定では、センサ電極に既知の電流  $I$  を一定時間  $T$  流し、電極に既定の電荷  $Q = IT$  をためる。そして、端子電圧  $V$  を測定し  $C = IT/V$  の関係から静電容量  $C$  を算出する。

単純な静電容量測定による水位推定では、水質の影響を受けることが知られており、自己校正機能を備えることが望ましい。Chetpattananondh らは、自己校正機能を備えた静電容量式水位計を用いた場合、溶液の pH、導電率、誘電率が異なっても測定結果に大きな影響が生じないことを示した [5]。そこで、この水位計でも、図 1 に示すようなセンサ電極を用い、メイン電極に加え、2つの校正用電極（水中・空气中）、配線容量除去用のパターンを4つの静電容量を通して、自己校正を行ったうえで水位を求めることとした。メイン電極の静電容量  $C$  は全長  $L$ 、電極幅  $W$ 、水没長  $l$ 、水中にある場合の単位面積当たり静電容量  $C_w$ 、空气中にある場合の単位面積当たり静電容量  $C_a$  を用いて  $C = \{lC_w + (L - l)C_a\}W$  として求められ、ここから  $l$  が逆算できる。 $C_w$ 、 $C_a$  は校正用電極がそれぞれ、完全に水中・空气中にあれば容易に求めることができる。ただし、水中用の校正電極については配線部が水に接触することで発生する静電容量が比較的大きいため、配線のみパターンを横に配置して、配線部で発生している容量を実測し、差し引いておく必要がある。

### 2.1 予備実験

この自己校正機能付き水位計について、まず実験室内で計測精度の確認を行った。静電容量測定には CTMU を

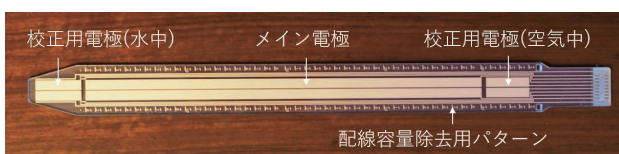


図 1 静電容量式の自己校正機能付き水位計

Fig. 1 Capacitive water level sensor with self-calibration.

用いた定電流法を用いるが、ここでは  $50\mu\text{A}$  の定電流を  $1.8\mu\text{s}$  流し、その後、静電容量センサに生じている電圧を 10 ビットのアナログ-デジタルコンバータ (ADC) を用いて計測した。なお、水田水位計測用静電容量センサの電極パターンは、 $50\mu\text{m}$  ポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムの上に  $35\mu\text{m}$  の銅箔を用いて実装した。この薄膜フィルムを  $5\text{mm}$  の PET 板に貼り付けて、センサプローブとした。メインの計測部を表す電極の長さ  $L$  は  $40\text{cm}$ 、水中・空气中の校正用電極の長さ  $r$  はそれぞれ  $4.45\text{cm}$ 、電極の幅は  $1\text{cm}$  である。実験では、 $5\text{cm}$  刻みで水槽に水を入れ、各水位ごとに 10 回静電容量を計測し、その平均値を用いて水位の推定を行った。そして、この水位計で推定した水位と真の水位の値を比較し、水位ごとの推定精度を調べた。なお、本実験中、静電容量センサで観測されたメイン電極の静電容量の推定値は  $0\text{cm}$  時に測定下限の  $60.0\text{pF}$  となり、 $40\text{cm}$  時に最大の  $1,040\text{pF}$  をとった。本水位計のような平行板型の電極は空气中で何も接触していない状態では、静電容量はたかだか数  $\text{pF}$  であり、観測される静電容量の変化はほぼ水の接触に起因するものと考えてよい。

図 2 に水位を推定した結果を示す。グラフの measured は静電容量を用いて推定した水位を示し、reference は設定した真の値を示しており、measured の値と reference と比較してその誤差を見ることで、水位計としての性能を評価できる。水位が  $0\text{cm}$  から  $15\text{cm}$  のときの推定誤差は  $2\sim 4\text{cm}$  となったが、 $25\text{cm}$  から  $40\text{cm}$  のときは誤差が  $1\sim 2\text{cm}$  となった。また、10 回計測した際の値のばらつき標準偏差に関しては、 $20\text{cm}$  までは  $0.5\text{cm}$  未満だったが、 $25\text{cm}$  あたりから標準偏差が増え、 $40\text{cm}$  の際は  $1.8\text{cm}$  と大幅に増加した。本実験では、水位が低い際は真の水位の値よりも大きい値を推定する結果となったが、これは水位が  $15\text{cm}$  以下の際に、配線部の静電容量が小さくなり、適切に測定できなかったことに起因すると考えられる。本センサでは、測定下限値を下回る静電容量は下限値 (約  $60\text{pF}$ ) として扱うため、配線容量を差し引いて求める水中の校正用電極の静電容量は低めに見積もられる。その結

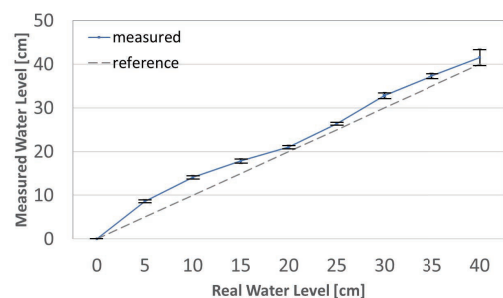


図 2 自己校正機能付き静電容量式水位計の計測結果

Fig. 2 Measurement result of capacitive water level sensor with self-calibration.

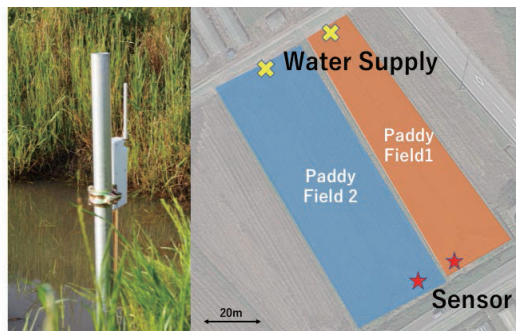


図 3 茨城県小美玉市における水位計設置状況（地図は Google Map より）

Fig. 3 Deployment map of water level sensor (Omitama, Ibaraki, Japan).

果、水位を高めに見積もってしまったと考えられる。このような場合、充電時間を短く再設定して繰り返し測定を行うことで、より小さな静電容量の測定を行うことも可能ではあるが、数 pF オーダの測定は浮遊容量など、周辺環境の影響が比較的大きくなり、高精度の測定が難しいため、今回は簡略化のため実装しなかった。また、水位が高くなるにつれて 10 回計測した際の値のばらつき標準偏差が増えた原因は静電容量の算出方法に起因する。定電流法での静電容量測定は ADC で測定した電圧の逆数として静電容量を求めるため、大きな静電容量を測定する場合、測定電圧は小さくなり、電圧の AD 変換の際の量子化誤差やノイズの影響が静電容量の測定結果により顕著に現れる。このため、標準偏差の増加が生じたと考えられる。

## 2.2 実圃場における試験

開発した静電容量式水位計を、茨城県小美玉市の水田に設置し実証実験を行った。実施期間は、2017 年 5 月 18 日から 2017 年 6 月 29 日の 1 カ月間であった。本評価では、水田における水位が一定に保たれているかに着目した。水位計は図 3 のように水田の排水口付近に設置し、1 時間おきに水位を取得した。また水位計は 2 つの水田に設置し、それぞれの水田で水位の値が一定に保たれているかを調べた。これらの水田では毎日午前 6 時までに水栓が開き、午後 6 時までに閉じるよう、手動でバルブの開閉が行われている。また、事前に降雨が予想される場合には前日の給水を行わないといった管理が行われている。図 4 がその測定結果と近隣の笠間市における日平均気温、日降水量である。図 4 の水田 1 では比較的短期間で水位は安定しており、6 月の後半では最大で 4 cm 程水位が変化している日があるものの、それ以外の日では 1 日の水位の変化は 1 cm 程度に収まっており、水位計の誤差を考慮してもほぼ水位が安定していると考えられる。一方、水田 2 では比較的短期間で水位の上下が激しく、6 月の後半では 1 日で水位が 3 cm 程上下した。先に述べたように、これらの水田では早朝に水を入れ、夕方以降は給水を止めているため、保

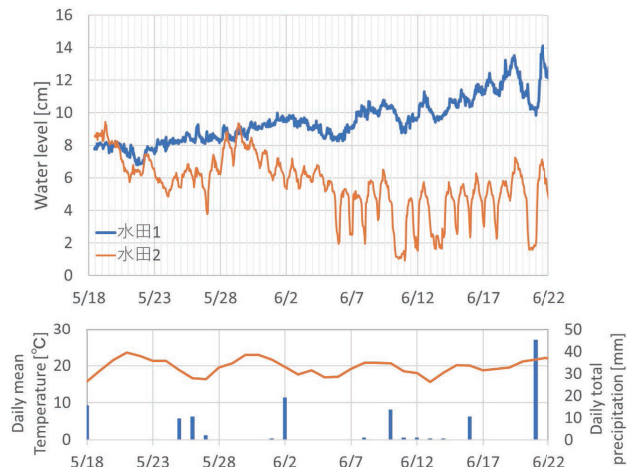


図 4 茨城県小美玉市における水田水位計の測定結果と日平均気温と日降水量

Fig. 4 The result of water level measurements in the paddy field, daily mean temperature and daily total precipitation.

水性が低い場合、水の供給のない夜間に水位が低下する。この短期的での変動はこれによる水位変動をとらえたものである。また、降雨前に給水を控えたことによる水位低下、降雨による水位回復は両水田で観測できた。このように、水田の水持ちの良し悪しなどをこの水位計を用いて測定し、水田の水管理の改善につなげることが可能である。

## 3. 反射時間計測と平行二線を用いた測定深度変更可能な水位計

水位測定はこれまで述べたような水田水位計のほかにも多様なニーズがある。たとえば、河川や湖沼の水位を測定して防災に役立てたり、地下水位の変化を測定して水資源の持続性を確認するといった用途が考えられる。用途によって必要な測定レンジ・精度は異なるので、なるべく構成要素を共通化しつつも、ニーズに応じて柔軟に対応可能な水位計が望ましい。水位測定の方式に関しては、静電容量方式では数メートルを超えた測定はプローブの実装コストや計測装置の測定レンジを考えると現実的ではなく、別の方式の導入を検討する必要がある。反射時間計測を利用する TDR 方式は比較的深い水位を安価なプローブで測定できるという点で、静電容量方式でカバーできない範囲を補完する手法となりうる。そこで、静電容量方式に加え TDR 方式による水位測定を導入することを考える。

TDR 方式は、伝送路にパルスやステップ信号を入力して、その反射波形および応答時間を観測することで伝送路の状態を解析する計測手法である。通常、特性インピーダンスが一様に分布した伝送路では、入力信号の反射は生じないが、周辺環境によりインピーダンスが不連続に変化した部分が存在すると、その界面で反射が生じる。この反射波を時間領域で観測することで、伝送路の状況を推定する

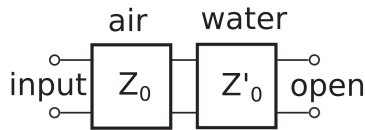


図 5 伝送線路が空气中に存在するときと水中に存在するときの回路モデル

Fig. 5 Equivalent circuit model representing a transmission line in air and water.

ことができ、これを水位計測に用いることができる。

TDR 方式の水位計では、プローブ周辺の比較的広い空間の誘電率が特性インピーダンスを左右するため、静電容量方式に比べて、プローブの表面に水分や汚れが付いても反射波形への影響が小さいというメリットがある。しかし、従来 TDR を用いて水位を計測する場合、サンプリングオシロスコープなど、高速でのサンプリングが可能な計測機器が必要となり、そのコストが問題となってきた。そこで、静電容量方式でも利用した PIC マイコンの CTMU を用いて、反射時間計測を行う簡易 TDR による水位計が提案されている [12], [13]。

### 3.1 平行二線を用いたプローブによる深度変更

TDR 方式では金属製プローブが広く用いられるが、周辺環境（水の有無）で特性インピーダンスが変化する伝送路であればよく、通信用ケーブルでもプローブとして機能する。通信用ケーブルは金属製プローブと比べると変形などによる影響が混入する難点はあるものの、すでに通信用途で量産されているため低価格であり、自由に切断して測定深度を変更可能であるという利点がある。そこで、我々は、PIC マイコンを用いた簡易 TDR において、従来提案されてきたステンレス製の専用のプローブではなく、平行二線と呼ばれる伝送線路を利用することで低価格かつ柔軟な測定深度の選択が可能な水位計を提案した。平行二線は構造が単純で製造・接続が容易なことから、かつてはテレビ信号線として広く用いられていたが、周辺環境からの影響を受けやすいことから、近年は同軸ケーブルで置き換えられている。この周辺環境から影響を受けやすいという特徴は、センサプローブとして利用する際にはかえって好都合であり、周囲に水があるかどうかで特性が変化するため、TDR による水位計測に用いることができる。

### 3.2 TDR 方式水位計の測定原理

プローブとなる平行二線の一部が水中に存在する場合、図 5 のように、特性インピーダンスの異なる 2 つの伝送路が接続された回路と見なすことができる。この回路において、特性インピーダンスの不連続点は、水面、および終端の開放部である。

空气中における平行二線の特性インピーダンスを  $Z_0$ 、水中における特性インピーダンスを  $Z'_0$  とすると、水面にお

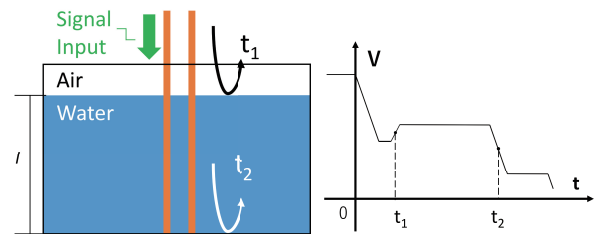


図 6 TDR による水位計測. 右のグラフは時刻  $t = 0$  に立下がりステップ信号を入力端に入力したときの信号レベルを時系列で表している

Fig. 6 Water level measurement by TDR. (Right) Voltage changes by reflections when a step-down signal is applied in  $t = 0$ .

ける反射係数  $\rho$  は以下のようにになる。

$$\rho = \frac{Z'_0 - Z_0}{Z'_0 + Z_0} \quad (1)$$

平行二線の特性インピーダンスは、一般に周囲の誘電率が高くなるほど減少し、水の比誘電率は空気の比誘電率よりはるかに高いため、水中の特性インピーダンスは空気の特性インピーダンスより低くなる。よって、式 (1) の反射係数  $\rho$  は負となり、この水面による反射波が伝送路の入力端に戻ると、電圧は一度入力と反対方向に変動する。解放された終端での反射係数は 1 となり、終端からの反射が入力端に到達すると電圧が入力と同方向に変動する。

また、平行二線に沿って進行する電磁波の伝搬速度  $v_p$  として、光速を  $c$ 、伝送路の周囲の媒質の比誘電率を  $\epsilon_s$ 、比透磁率を  $\mu_s$  とすると、

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\mu_s \epsilon_s}} \quad (2)$$

となる。空気と水に関して、比透磁率は両者ともほぼ 1 だが、比誘電率は空気がほぼ 1 なのに対し、水はおおよそ 80 と大きく異なる。よって、この式より水中の平行二線では信号の伝搬速度が遅くなり、水中に存在する部分が長いほど、終端での反射波の影響が入力端に現れるまでの時間が長くなる。

図 6 に、平行二線の一部が水中に存在する際にステップ信号を  $t = 0$  で入力したときの入力端で観測できる電圧波形を示す。

時刻  $t = 0$  に伝送路の入力端にステップ信号が入力された後、 $t_1$  で空気と水の界面で反射した信号が入力端に戻る。また、終端でも入力信号は反射し、時刻  $t_2$  に入力端に戻る。水位は  $t_1$  および  $t_2$  のどちらからでも算出可能であるが、一般に、水面におけるインピーダンス変化による反射より、終端での反射の方が大きく、観測が容易であると予想されるため、以後では  $t_2$  を主に用いて水位の推定を行うことを前提に議論を進める。

ここで平行二線全体の長さを  $L$ 、水位を  $l$ 、信号の空气中、水中での伝搬速度を  $v, v'$  としたとき、 $t_1, t_2$  の関係は

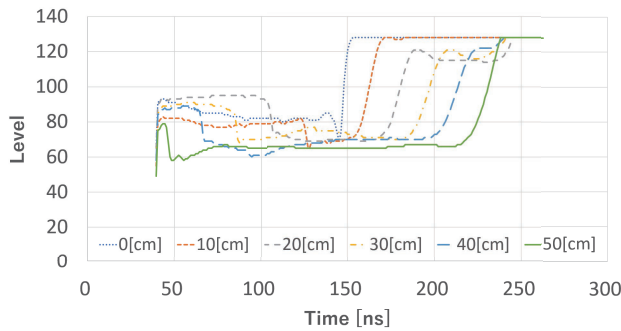


図 7 VNA の時間領域計測機能を用いて計測した各水位での反射波  
**Fig. 7** Reflected waveforms in each water level measured by time domain measurement feature of a VNA.

以下のようになる

$$t_1 = \frac{2(L-l)}{v} \quad (3)$$

$$t_2 - t_1 = \frac{2l}{v'} \quad (4)$$

$$t_2 = \frac{2(L-l)}{v} + \frac{2l}{v'} \quad (5)$$

$$= \left( \frac{2}{v'} - \frac{2}{v} \right) l + \frac{2L}{v} \quad (6)$$

以上より、いずれも  $l$  の一次式となるため、事前に  $L, v, v'$  を把握することで、 $t_2$  から  $l$  を推定することが可能となる。

$L, v$  は事前に把握可能ではあるが、 $v'$  は水質に影響されつど測定するのは困難なため、実用上は式 (6) より求まる下記の水位の変位  $\Delta l$  と反射時間の変位  $\Delta t_2$  の関係性を用いて推定する。

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta l} = \frac{2}{v'} - \frac{2}{v} \quad (7)$$

複数深度の  $l$  と  $t_2$  の組合せから、この式を用いて  $\frac{2}{v'} - \frac{2}{v}$  および  $\frac{2L}{v}$  を推定できる。

こうして推定したパラメータを、式 (6) を変形した

$$l = \frac{t_2 - \frac{2L}{v}}{\frac{2}{v'} - \frac{2}{v}} \quad (8)$$

に当てはめると、反射時間  $t_2$  から水位  $l$  を推定することができる。この式を見ると反射時間と水位は線形な関係となると予想される。

図 7 に R&S ZNB20 Vector Network Analyzer (VNA) の TDR 機能を用いて測定した、一部が水中に配置された特性インピーダンス  $300 \Omega$  の平行二線からの反射波を示す。図 6 (右) のとおり、水面での反射による立ち上がり、終端からの反射による立ち上がりが観測されているが、終端からの反射がより明確に現れている。一般に TDR 方式の水位計では、水面からの反射の影響を利用するが、水面からの反射を正確にとらえるにはプローブと測定回路との間で正確にインピーダンス整合が取られている必要がある。本研究では、平行二線のように安定性に欠ける伝送路をプローブとして用いているため、推定式の複雑性は増すが、

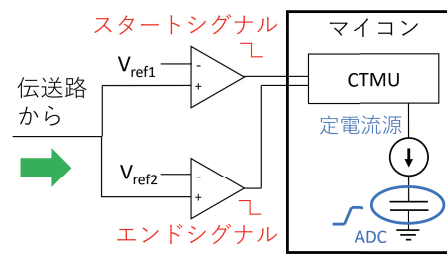


図 8 CTMU による反射時間計測。伝送路上の信号が  $V_{ref1}$  を下回ったところで CTMU が ON になり、定電流が ADC 内部のキャパシタに流れ始める。伝送路上の信号が  $V_{ref2}$  を下回ったところで CTMU が OFF になり、定電流が止まる。キャパシタの電圧から定電流が流れた時間が計測できる

**Fig. 8** Reflection time measurement by CTMU. CTMU is turned ON when the signal cut down  $V_{ref1}$  then CTMU starts supplying constant current to a capacitor in ADC. CTMU is turned OFF when the signal overcome  $V_{ref2}$  then CTMU stop supplying. After that, the time supplying current can be calculated from charged voltage on the capacitor.

終端からの反射の伝搬速度の違いを用いた水位推定を採用した。なお、この VNA での測定は立ち上がり信号を用いて反射波の計測をしているが、他の計測では図 6 のような立ち下りのステップ信号を用いている。これは使用するマイコンの特性上、立ち下りの方が応答性がよいためで、原理的にはどちらを用いても同様の測定が行える。

### 3.3 CTMU ユニットによる反射時間計測

静電容量方式でも用いた PIC マイコンに内蔵された CTMU を利用して時間計測回路が実装可能であり、それを用いて簡易的な反射時間計測を行うことができる。

図 8 に PIC の CTMU を用いた反射時間計測の概要を示す。先に述べたように、水位を計測するにあたっては、入力信号の反射波形の応答時間を計測する必要がある。しかし、数十 cm から数 m 程度の伝送路の波形の応答時間は、数ナノ秒のオーダーであり、通常の汎用マイコンのタイマカウンタでは測定できない。一方で、外部入力からの割込みによる CTMU の ON/OFF は内部クロックとは独立して高速に行えるので、これを時間計測に応用すれば、ナノ秒単位での時間計測も可能である。そこで、CTMU によって容量が既知のキャパシタに一定電流を流し、流し終えた後にキャパシタの電圧を計測することで、キャパシタの静電容量の値から間接的に電流が流れた時間を推定する。静電容量  $C$  のコンデンサに、一定電流  $I$  の電流を時間  $t$  だけ流して計測された電圧を  $V$  としたとき、 $C, I, t, V$  の関係は以下のようなになる。

$$t = \frac{CV}{I} \quad (9)$$

これにより、静電容量  $C$ 、電流  $I$  が既知ならば、電圧  $V$  から、電流の流れた時間  $t$  を推定することができる。

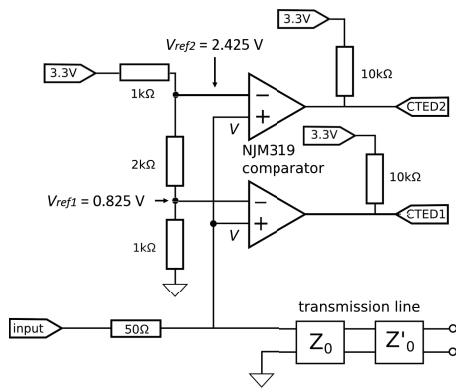


図 9 反射波検出回路,  $V_{ref1}$  が 0.825 V,  $V_{ref2}$  が 2.425 V に設定されている

Fig. 9 Reflection wave detector. It is designed to make  $V_{ref1}$  0.825 V and  $V_{ref2}$  2.425 V.

波形の反射時間を計測するためには、信号を入力した時点で CTMU から電流を流し、反射波が帰ってきた時点で電流を止める必要があり、各タイミングを検出する必要がある。図 9 のようなコンパレータを用いた回路を用いれば、伝送路の入力端の電圧がある閾値を超えているかどうかを 2 値で表すことができ、これを CTMU の ON/OFF 制御用の入力（立上がり信号利用時：CTED1=ON 用，CTED2=OFF 用，立下がり信号利用時：CTED1=OFF 用，CTED2=ON 用）につなぎこむことで、各タイミングで CTMU を ON/OFF させることができる。具体的には、信号入力開始時に ON となり、終端での反射で OFF になるよう図 9 に示すように各電圧閾値  $V_{ref1}$ ,  $V_{ref2}$  および制御ピンを設定した。

### 3.4 予備実験

この平行二線および作成した回路を用いて水位推定が行えるかを確認するため、水位と反射時間の線形性について調べた。伝送路には、発泡ポリエチレンで絶縁した特性インピーダンス 300 Ω の平行二線を終端を開放させて用いた。測定用マイコンには PIC24FJ64GB002 を用い、平行二線への入力としては、3.3 V の立下がりステップ入力を与えた。入力端の電圧を、日本無線製の NJM319 コンパレータに入力し、閾値との比較結果を、今回用いたマイコンである PIC の CTMU の ON/OFF 制御ピンである CTED1 と CTED2 に繋いだ。

CTMU での時間計測に利用する容量固定のキャパシタについては、マイコン内部のアナログ・デジタルコンバータ (ADC) キャパシタを利用することで、回路の簡便化を図った。なお、CTMU から流す電流は、55 μA に設定した。具体的には、ADC の静電容量は 5 pF 程度となり、電流 CTMU の設定により、最大で 55 μA に設定できるので、基準電圧の 3.3 V まで 300 ns 程度で充電が完了する。よって、0~300 ns の間を 10 bit でデジタル化するため、約

0.3 ns の分解能で測定できる。図 7 の波形を見ると、入力から反射はこの時間範囲内に収まっている。また、水位が 10 cm 上昇すると 18 ns 程度の反射時間の遅延が観測されており、1 cm あたりでは 1.8 ns の反射時間増が予想される。これらから、本測定手法を用いて、センチメートル精度での水位測定が可能であることが分かる。

本手法においては 2 つのコンパレータの応答タイミングの時間差を得ることで測定を行っているため、2 つの素子の応答特性に大きな差が生じないことが重要である。NJM319 の応答速度は約 80 ns で、2 つのコンパレータはともに 10 kΩ のプルアップ抵抗を持ち、出力端の寄生容量による時定数の影響を受けるが、これらの影響は双方に同様に生じるため、差分をとることで回避できる。反射信号を入力電圧にしていることから、オーバドライブ電圧が異なることによる応答時間の差はそれぞれ別個に生じるため、留意する必要がある。NJM319 では、立上りのステップ入力より、立下りの方が応答時間が短く、入力オーバドライブ電圧の差による応答時間の変動も小さい。本測定手法は立上がり・立下りどちらでも利用可能であるが、応答時間を早めるため、立下りステップ入力を利用することが望ましく、以降の実験においては立下り信号を用いている。

十分なオーバドライブ電圧を確保するためにも、入力開始および終端の反射波を検出する閾値は適切に選択する必要がある。ステップ信号を入力した場合、理想的な伝送路であるとすると、入力開始時点にステップ入力の 1/2 倍の電圧変動が起こり、終端からの反射が到達した時点で残りのステップ入力 1/2 倍の変動が生じる。実際には液界面での反射などがあるため、条件は異なるが、この予備実験では理想的な伝送路であると見なして、各変動の中間に閾値を設定して変動を検知することとした。具体的には、ステップ入力の 1/4 倍の電圧を閾値  $V_{ref1}$  に、ステップ入力の 3/4 倍の電圧を閾値  $V_{ref2}$  にそれぞれ設定した。予備実験として、図 10 に示すような構成で実験を行い、水位と測定された反射波検出までの時間を測定した。

3.2 節で述べたように、水位と反射時間は線形な関係となると予想されるが、水中での伝搬速度  $v'$  は水質・設置環境などにより異なるため、測定環境によって変動することから、測定対象溶液ごとに校正を行わなければならない。また、反射時間の絶対値を得るためには、時間計測用に用いる ADC 内のキャパシタの容量を正確に求めて校正する必要がある。本予備実験の目的は、これらの諸要因を含む提案方式の測定値と実際の水位が線形な関係を示すかどうかの検証であるため、本実験では校正前の 10 bit ADC の出力を用いて検証を行う。

### 3.5 水位と反射時間の値の比較

図 11 に水位と反射時間を表す ADC の出力の関係を示

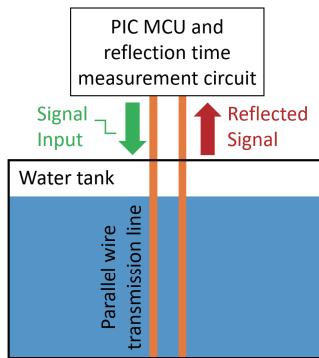


図 10 アクリル水槽の側面に特性インピーダンス 300 Ω の平行二線を貼り付け、ステップ信号を入力し、その反射波の反射時間を読み取る

Fig. 10 Parallel wire transmission line, whose characteristic impedance is 300 Ω, is attached in the water tank. A step signal is applied and reflection time is measured.

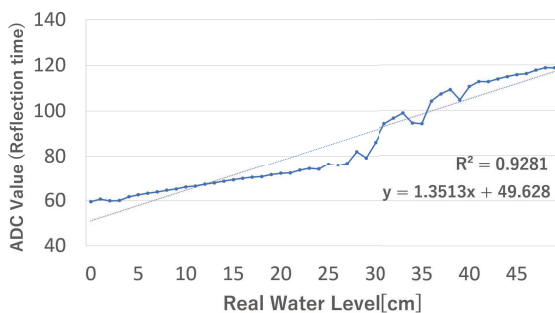


図 11 水位上昇時の入力信号の反射時間と水位の関係. 青の実線は計測した値を表し. 点線は実線を直線に近似した近似曲線を表す

Fig. 11 Relationship between reflection time and water level (blue line) with linear approximation curve (blue dotted line).

す. この結果, 0~25 cm と 25~35 cm の場合では傾きが異なり, 部分的な線形性は確認できたものの, 固定の閾値では全域での線形性は確保されていないことが確認された. この問題に対しては,  $V_{ref2}$  の閾値を変更可能とするため, 図 9 で固定の抵抗としていた部分を 128 段階に切り替えられる電子ボリュームである MCP4018 で置き換えた. 水位を測定する際, 閾値電圧を切り替えながら繰り返し測定を行うと, 信号入力後に初めてその電圧に達した時間を得ることができる. このときの閾値電圧と検出時間をプロットした例が図 12 である. 閾値電圧を下げていった際に, 最初に大きく検出時間が変動するのが, 入力直後には閾値電圧を下回らず, 終端での反射によって, 閾値電圧を下回る条件である. そこから, さらに閾値電圧を下げていっても, 終端からの反射による電圧変動は比較的急激かつ大きいため検出時間の変動は小さい. さらに閾値電圧を下げると, 液界面や入力端での多段の反射などによる検出時間の変化が検出される. また, 水深や測定に用いるケーブル長

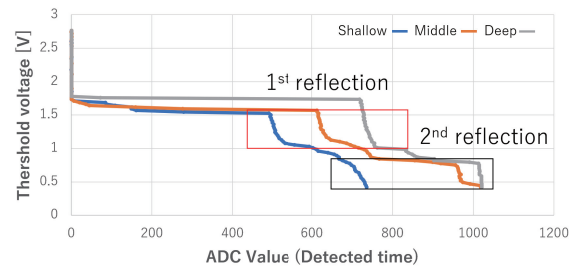


図 12 閾値電圧  $V_{ref2}$  を変更しつつ繰り返し測定してえられた. 電圧と検出時間を示す ADC の値

Fig. 12 Relationship between threshold voltage  $V_{ref2}$  and ADC value which represents detected time.

によって, 1 段目の反射をとらえられる閾値は異なることがあり, 固定の閾値では反射波の中から, 最初の終端からの反射をとらえられているとは限らない. しかし, 閾値電圧を変更しつつ繰り返し測定行えば, 前述のような手順で最初の反射のみを検出することができる. こうして得られた最初の反射の部分の平均検出時間を反射時間とすることで, より広い範囲で線形性を確保することができた. また, コンパレータをより高速な応答速度 (約 4.5 ns) を持つ Linear Technology LT1711 に置き換えることで, 精度向上を図った.

### 3.6 様々な長さの平行二線を用いた測定

平行二線を用いた簡易 TDR 方式の水位計の利点として, 測定する水位の範囲をケーブルの長さで自由に決められることがある. そこで, これまで作成してきた回路で様々な長さの平行二線で測定が行えるか検証した. この実験では, 特性インピーダンス 300 Ω の平行二線を用いて, この伝送路上の反射時間を計測した. 終端は開放し, 入力端は回路側で 300 Ω の抵抗を用いて整合させた. 予備実験として, 0.2 m から 0.1 m 刻みの平行二線を用意し, 空気中で終端からの反射時間を確認したところ, 0.60 m 以下では短い反射時間の間に ADC 内のキャパシタに十分に充電ができず, 充電後の電圧測定が困難であり, 反射時間の測定が行えなかった. このことから, 本回路で利用可能な平行二線の長さの下限は 0.60 m であると分かった. 測定パラメータの動的な変更などを行えば, より短い平行二線でも測定できる可能性はあるが, 静電容量式の場合と同様, 微小な静電容量の測定はノイズの影響などを受けやすいため, ここでは固定のパラメータでの測定にとどめている.

1 m 以下の比較的浅い水位を測定対象とする場合は, 図 13 のように水底にケーブル終端を配置するのではなく, 水底で折り返して往復させることで, 経路長を稼ぐことで, 測定に必要な充電時間を確保することができる. そこで, 本実験では 0~30 cm および 0~1.0 m の水位測定を想定したプローブでは, それぞれ 60 cm, 2.0 m の平行二線を用意し, 往復させることとした. 0~10 m を対象としたものに



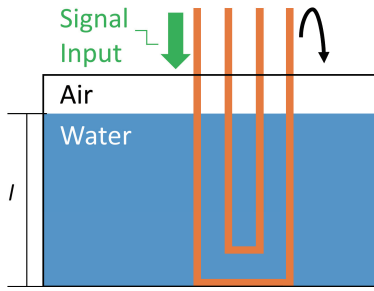


図 13 往復させた平行二線への信号入力と反射波の流れ

Fig. 13 Round trip layout of parallel wire transmission line and direction of reflection wave.

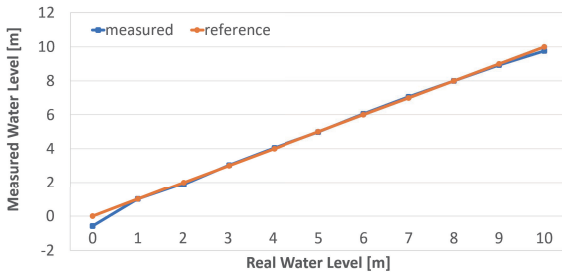


図 14 0~10m 用のプローブでの水位推定結果

Fig. 14 Measurement result of a sensor designed to measure for 0 to 10 m.

については十分な反射時間が確保できるため、従来通り片道とした。

### 3.6.1 伝送路の水中に存在する部分の長さ推定

実験では平行二線を用いたプローブを水中に沈め、水位を変化させて推定を行った。なお、0~10mのものについては、垂直方向に10mの水深を用意するのが困難なため、横方向にケーブルを伸ばし、指定の長さのみ水没させることで、疑似的に水位変化を再現した。各水位において波形を5回取得し、波形から得られた反射時間の平均値をその水位の反射時間とした。3.2節で述べたように、水位と反射時間の関係は線形になると考えられ、そのパラメータは複数深度の測定結果から推定することができ、これにより近似曲線が得られる。線形性が保たれていれば、よい近似が得られるが、線形性が担保されない領域では、ADCの出力から近似曲線を用いて算出した水位が実験で設定した真値と異なり、誤差が生じる。許容される誤差は平行二線の長さによって決まる測定レンジに応じるものと想定し、測定レンジの5%以内の精度で推定できていれば、水位計として有効に機能すると見なすこととした。たとえば、測定レンジを0~10mと設定した場合、50cm以上の誤差が発生する領域は計測範囲外と見なす。

図 14, 図 15, 図 16 が各測定レンジにおける水位推定の結果であり、精度および有効範囲を表 1 にまとめる。0~10mでは、水位が0mのときは、得られた校正曲線から大きく外れたため、計測範囲外としたものの、それ以外

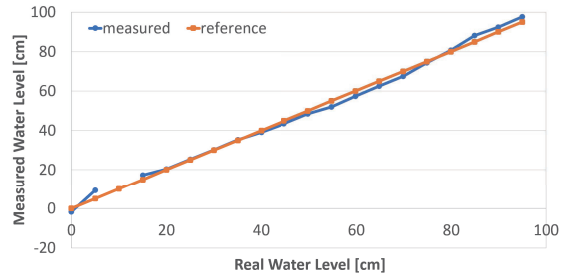


図 15 0~1m 用のプローブでの水位推定結果

Fig. 15 Measurement result of a sensor designed to measure for 0 to 1 m.

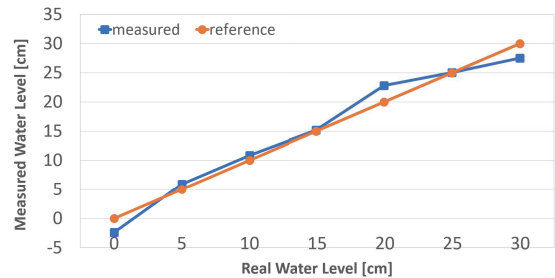


図 16 0~30cm 用のプローブでの水位推定結果

Fig. 16 Measurement result of a sensor designed to measure for 0 to 30 cm.

表 1 水位計測の精度および有効範囲

Table 1 Accuracy and usable range of water level measurement.

水位計測範囲	センサ有効範囲	平均誤差	最大誤差
0~10 m	1.0~10 m	9.1 cm	24 cm
0~1.0 m	0~0.95 m	2.1 cm	4.5 cm
0~30 cm	5~15 cm	0.71 cm	0.89 cm

では妥当な推定が行え、水位計として使える有効範囲は1.0~10mとなり、この範囲内での平均的な誤差は9.1cmとなった。計測範囲内では、水位が10mのときに大きく誤差が生じ、校正曲線と比較した場合、約24cmの誤差が生じた。一方0~1mでは計測範囲は0~95cmとなり、平均的な誤差は2.1cmとなった。また、0~30cmの計測範囲では、有効範囲が5~15cmとなり、低水位の際は静電容量方式と比較して精度が劣った結果となった。すべての測定レンジにおいて、水位が0付近の低水位の際や、伝送路の長さとはほぼ同じ水準に水位がある際に誤差が大きくなった。実用上は中間領域を最も使用するため、大きな問題とはならないと考える。

## 4. おわりに

本研究では多様な水位計の用途に対応できるよう、静電容量方式とTDR方式の両方を共通の汎用マイコンを用いた回路で実現する水位計の提案を行った。静電容量式水位計では汎用マイコンであるPICのCTMUを用いた定電流

法での静電容量測定を用いた。この水位計は自己校正機能を有し、水質や温度の影響を受けずに測定を行える。また、CTMUを用いてナノ秒オーダーでの時間測定も可能であることに着目し、反射時間計測による簡易 TDR 方式の水位計の実装も行った。反射波検出回路が追加ではあるが、同じ PIC を用いているので、静電容量方式の水位計への統合は容易である。この簡易 TDR 方式ではプローブに通信ケーブルである平行二線を用いることで測定深度の変更が簡単に行えるようになっている。これらの手法を組み合わせることで、水田のような数 cm 程度の比較的浅い深度から、河川・湖沼の水位計測を想定した 10m 程度の深度まで対応できる水位計が実現可能である。今後の課題としては静電容量方式では低深度での精度向上や基準電極の配置、設置方法の簡便化があげられ、簡易 TDR 方式については、実圃場での運用を通して実用性の評価を進めていきたい。

**謝辞** 本研究は JST ERATO JPMJER1501 の支援を受けて行われたものである。また、本研究は株式会社 SenSprout, 有限会社ユニオンファームの協力のもとなされた。

#### 参考文献

- [1] 株式会社ノーケン：超音波式レベル計・MultiRanger 100/200, 入手先 ([http://www.nohken.com/japan/product/level\\_sensor/noncontact/mr100200.html](http://www.nohken.com/japan/product/level_sensor/noncontact/mr100200.html)) (参照 2018-12-23)。
- [2] 和泉幸一, 松平正樹, 永重 務：河川監視システム, Oki テクニカルレビュー, 沖電気工業 (2014)。
- [3] Terzic, J., Terzic, E., Nagarajah, R. and Alamgir, M.: Ultrasonic Sensing Technology, *Ultrasonic Fluid Quantity Measurement in Dynamic Vehicular Applications*, Springer, pp.11-35 (2013)。
- [4] Tung, T.D., Masaru, M., Yoshihiro, K. and Tohru, A.: Error Reduction in Capacitive Based Water Level Sensor for Paddy Field, 電子情報通信学会総合大会, B-18-16, No.1, p.524 (2016)。
- [5] Chetpattananondh, K., Tapoanoi, T., Phukpattaranont, P. and Jindapetch, N.: A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.209, pp.175-182 (2014)。
- [6] JFE アドバンテック：投込圧力式水位計 SL シリーズ, 入手先 (<https://www.jfe-advantech.co.jp/water/pdf/JC-SLS-16A.pdf>) (参照 2018-12-23)。
- [7] Thomsen, A., Hansen, B. and Schelde, K.: Application of TDR to water level measurement, *Journal of Hydrology*, Vol.236, No.3, pp.252-258 (2000)。
- [8] Loizou, K., Koutroulis, E., Zalikas, D. and Lontas, G.: A low-cost sensor based on Time-Domain Reflectometry for water level monitoring in environmental applications, *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp.261-266, IEEE (2015)。
- [9] Moret, D., López, M.V. and Arrue, J.L.: TDR application for automated water level measurement from Mariotte reservoirs in tension disc infiltrometers, *Journal of Hydrology*, Vol.297, pp.229-235 (2004)。
- [10] Chih, C.C., Chih, P.L., Wu, I.L., Ping, H.C. and Ting,

K.T.: New TDR waveguides and data reduction method for monitoring of stream and drainage stage, *Journal of Hydrology*, Vol.505, pp.346-351 (2013)。

- [11] Cataldo, A., De Benedetto, E., Cannazza, G., Monti, G. and Piuze, E.: TDR-based monitoring of rising damp through the embedding of wire-like sensing elements in building structures, *Measurement*, Vol.98, pp.355-360 (2017)。
- [12] Bartling, J.: Time Domain Reflectometry (TDR) for low-cost liquid level measurement, available from (<http://www.edn.com/design/sensors/>) (accessed 2018-12-23)。
- [13] 鈴木康大, 繁田 亮, 川原圭博, 浅見 徹：汎用マイコンで可能な反射時間計測による簡易 TDR を利用した低価格水位計の開発, 電子情報通信学会技術報告, Vol.116, No.308, ASN2016-54, pp.97-102 (2016)。



繁田 亮 (正会員)

1988 年生。2011 年京都大学工学部電気電子工学科卒業。2013 年東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了。2018 年同大学院博士課程修了。情報理工学博士。同年より東大特任研究員。ユビキタスコンピューティング

分野において農業 IoT システムやエナジーハーベスティングに関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



鈴木 康大

1993 年生。2016 年東京大学工学部電子情報学工学科卒業。2018 年同大学院情報理工学系研究科修士課程修了。ユビキタスコンピューティング分野において農業 IoT システムに関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



川原 圭博 (正会員)

1977 年生。2000 年東京大学工学部電子情報学工学科卒業。2002 年同大学院情報理工学系研究科修士課程修了。2005 年同博士課程修了。情報理工学博士。同年東大助手, 助教, 講師, 准教授を経て 2018 年同大学院工

学系研究科教授。ユビキタスコンピューティング分野においてセンサネットワークやエナジーハーベスティングに関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員。