

修士論文

汎用マイコン内蔵の定電流源を活用した
静電容量及び反射時間計測による
深度選択可能な低価格水位計

2018年2月1日

指導教員 川原 圭博 准教授

東京大学 大学院情報理工学系研究科
電子情報学専攻 48-166432

鈴木 康大

概要

農業の生産性向上や風水害対策に向けて、低価格で設置が容易な水位計への期待が高まっている。国内農業において、水稲は伝統的に主要な農産物である一方、国内需要の低下、品質の向上が進む海外産との競争、担い手不足などの問題を抱えており、生産効率の改善や品質向上による国際競争力の獲得が急務である。水稲栽培の効率化には大規模・機械化が欠かせない。農家の高齢化と農業への企業参入が進むにつれ、水田は農業生産法人を中心に意欲のある農家に集約されつつあるが、水田は家族単位で所有することを前提に管理されてきたため、数 km 範囲に主有する水田が点在する状況が生じており、効率化を妨げている。例えば、散在する水田の水位が適切に保たれているかを確認してまわるだけで、数 km の移動が発生してしまい、労働生産性が著しく押し下げられているような例もある。こうした背景のもと、継続モニタリング可能な無線水位計を導入し、水位の監視を遠隔から行い、発展的には遠隔操作可能なバルブを使用して、圃場を訪れずに水位管理を行う水田管理システムの開発が検討されている。米は高付加価値化が難しく、高い収益性が見込めないため、設備投資に充てられる予算は限られており、現在流通している水位計の価格では普及は見込めない。また、遠隔から水位を監視するシステムは防災上も重要な役割がある。近年は集中豪雨による水害が激甚化してきており、急速に水位が上昇して土砂災害につながるなど、従来の水位監視網を用いた対策では不十分になりつつある。対策の強化には、より多くのセンサを展開し、細かい粒度で水位をモニタリングすることが望ましいが、やはり現在販売されている水位計の価格では広域展開に適さない。水田管理向け水位計と河川・湖沼向け水位計では、要求仕様が大きく異なり、前者では十数 cm 程度までの深さをサブ cm オーダーの精度で計測することが、後者では設置環境にあわせて数 m から数十 m 程度の深さを数%の誤差で計測することが期待される。

本研究では、汎用マイコンの定電流源モジュールを用いて幅広い水位計測の需要に対応する深度選択可能な低価格水位計の開発について述べる。今回は、水田管理向けに静電容量計測を用いた水位計と、湖沼・河川の防災向けに Time Domain Reflectometry(時間領域反射計測法, TDR) 法を用いた水位計の二つを開発した。静電容量計測を用いた水位計では、薄膜電極を用いることで大量生産した際のコストを大幅に抑え、また水位計測用のプローブを脱着可能にすることで、数 cm から数十 cm の範囲の水位推定を可能にする。本水位計の計測回路は既存の静電容量式土壌水分センサと共用としており、畑作と稲作の双方を手掛ける農家は、土壌水分センサを導入していれば、他に新たに水位計を導入する必要がなく設備投資を抑えられる。また、この静電容量計測を用いた水位計は実験室内での予備実験に加え、実際の水田に設置して実証実験を行い、その有効性を検証した。得られる精度は 0 cm~40 cm の範囲で 4 cm 以内であり、水田管理用途には十分な精度であった。TDR を用いた水位計に関しては、通信用のケーブルとして安価に入手可能な平行二線(フィーダー線)を用いた水位推定を行う。通信用ケーブルを用いることで、必要な長さだけ切り取って使う事ができ、深さの異なる湖沼・河川にあわせて現地での計測深度の変更

が可能である。従来、TDRにはサンプリング周波数が高い高価な計測機器が必要であったが、本水位計では、汎用マイコン内蔵の定電流源を時間計測に応用することで、マイコンの動作周波数以上のナノ秒単位での計測を安価に実現した。これにより従来汎用マイコンでは計測できないような高速な信号の波形の描画を可能にした。このTDRによる水位計では30 cmから10 mまでの範囲で10 cm程度の精度で計測できており、河川・湖沼の水位管理に適したものであることが確認された。これら二つの水位計はそれぞれ適した計測範囲が異なるが、二つを適切に組み合わせることで、様々な水位計測の需要を満たす低価格水位モニタリングシステムとして提供可能である。

目次

第1章	序論	1
1.1	本論文の背景	2
1.1.1	水資源管理需要	2
1.1.2	防災用水位監視需要	3
1.1.3	深度選択可能な低価格水位計	3
1.2	本論文の構成	4
第2章	関連研究	5
2.1	はじめに	6
2.2	無線センサネットワーク	6
2.2.1	低コスト環境情報センサ	6
2.2.2	低コストセンシングのための運用技術	7
2.3	継続モニタリング可能な水位推定手法	8
2.3.1	超音波による水位推定手法	8
2.3.2	圧力検知による水位推定手法	10
2.3.3	静電容量方式を用いた水位推定手法	10
2.3.4	TDRを用いた水位推定手法	11
2.4	まとめ	13
第3章	静電容量計測を用いた水位計の開発	15
3.1	はじめに	16
3.2	計測回路及びプローブ設計の際の課題	16
3.2.1	子機に関するコスト	16
3.2.2	薄膜上の配線間容量除去	17
3.3	静電容量計測回路及び水田水位計測プローブの設計	18
3.3.1	安価なマイコンを用いた静電容量計測回路	18
3.3.2	セルフキャリブレーション可能な水田水位計測プローブ	18
3.3.3	実装した薄膜実装水位センサの計測精度	20
3.4	薄膜実装水田水位計の実証実験	21
3.4.1	茨城県小美玉市における水位センサの運用	21
3.4.2	田無における水位センサの運用	22
3.4.3	実証実験で明らかとなった課題	23
3.5	まとめ	24

第 4 章	Time Domain Reflectometry を用いた水位計の開発	25
4.1	はじめに	26
4.1.1	平行線路における反射時間と水位の関係	26
4.2	VNA による反射時間計測	28
4.2.1	実験環境	29
4.2.2	実験結果	30
4.3	平行二線によるマイコンを用いた水位推定手法	31
4.3.1	CTMU ユニットによる反射時間計測	31
4.3.2	実験環境	33
4.3.3	水位と反射時間の値の比較	34
4.4	複数の閾値を用いた TDR による水位推定手法	36
4.4.1	波形取得回路	36
4.4.2	波形からの反射時間取得	37
4.4.3	波形観測による水位推定実験と結果	38
4.5	まとめ	42
第 5 章	結論	43
5.1	本研究の主たる貢献	44
5.2	今後の課題	44
	謝辞	51

目 次

1.1	水位センサを活用した際の労働時間・水利用量の削減効果 [1]	2
2.1	低価格土壌水分プロファイルプローブ用電極 [14]	7
2.2	Gamicos 製 100m 水位計測器 [19]	8
2.3	手動による地下水位計測 [20]	8
2.4	超音波による水位計測原理 [22]	9
2.5	タンクの中の水位をタンク外から超音波を発生し、水位を推定する原理 [23]	9
2.6	沖電気による超音波水位計を用いた河川水位モニタリングシステム [24]	9
2.7	PaddyWatch [26]	10
2.8	投げ込み式水位計 [27]	10
2.9	平面上に実装した楕円電極. 電極と水の間でキャパシタが形成される.	11
2.10	水位計測のためのリファレンス電極と水位計測用の電極 [28]	11
2.11	TDR による水位計測原理 [31]	12
2.12	TDR による水位計測の際の波形サンプリング手法 [31]	12
2.13	TDR による土壌水分量推定手法 [32]	12
2.14	PIC による反射時間を計測した水位推定手法 [33]	13
3.1	(上)GND を共通にした薄膜上の電極 (下) GND を分離した薄膜上の電極	16
3.2	GND が共通である水位計と, GND が分離された水位計による, 水位の計測誤差を表したグラフ	17
3.3	計測回路と差し替え可能な計測用プローブ	18
3.4	今回実装した水位計子機の概要図	19
3.5	今回実装した水位計の実験室における計測結果	20
3.6	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)	21
3.7	茨城県小美玉市における水田 1 の水位計の結果	22
3.8	茨城県小美玉市における水田 2 の水位計の結果	22
3.9	田無における水位計設置状況 (地図は Google Map より)	23
3.10	田無における水位計の結果	23
4.1	平行二線伝送路が空気中に存在するときと水中に存在するときの回路モデル. 空気と水の境界面, 及び終端の開放部で, 伝送路の特性インピーダンスが不連続に変化するため, 信号の反射が起こる.	26
4.2	TDR による水位計測. 右のグラフは時刻 $t = 0$ に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.	26
4.3	実験で用いたフィーダー線と水位の関係	29

4.4	VNA による平行二線の計測結果	29
4.5	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エッジが CTMU に入力され, 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再びエッジが CTMU に入力され, 定電流が流れ終わる. その後 ADC でキャパシタの電圧を計測することで, キャパシタに溜まった電荷から定電流が流れた時間を計測する.	31
4.6	反射波検出回路, V_{ref1} を 0.825 V に設定し, 定電流を流すために CTED1 に立ち下がり信号を送る. また, V_{ref2} を 2.425 V に設定し, 定電流を流し終えるために CTED2 に立ち下がり信号を送る.	32
4.7	回路による反射時間の読み取り例	33
4.8	実験構成を表した図. 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, この平行二線にステップ信号を入力し, その反射波の反射時間を PIC と反射波計測回路を用いて読み取る.	33
4.9	実際に平行二線をアクリルの箱に取り付けて, 水位を計測している図	34
4.10	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.	35
4.11	回路による反射時間の読み取り例	36
4.12	MCP4018 の概要. 右の回路の V_{ref1} および V_{ref2} に, 別々の MCP4018 の V_{ref} を繋ぐ.	36
4.13	今回作成した回路で取得された電圧波形の概形	37
4.14	今回作成した波形取得回路の実物	37
4.15	伝送路の長さ計測結果 (0.8m-1.8m)	38
4.16	伝送路の長さ計測結果 (0.7m-1.7m)	38
4.17	伝送路の長さ計測結果 (0.6m 以下)	39
4.18	閾値が 0.6-1.5 V での線型性比較	39
4.19	計測に使用した平行二線	40
4.20	水位が 0~30cm の際の水位推定結果	40
4.21	水位が 0~1m の際の水位推定結果	40
4.22	水位が 0~10m の際の水位推定結果	40
4.23	平行二線への信号入力	41
4.24	平行二線への信号入力 (往復)	41

■ 表 目 次

1.1	用途別に想定される水位推定範囲	3
4.1	VNA から読み取れる反射時間	30
4.2	VNA から読み取れる伝送路の伝搬速度	30
4.3	水位計測の精度	41

■ 第1章

序論

1.1 本論文の背景

1.1.1 水資源管理需要

農業を営む上で、水は不可欠な存在である。地球上に存在する水のうち、人間が利用できる水の量はわずか0.008%であり、さらにその3分の2が農業用途に利用される。世界的な人口増加や地球温暖化などの環境変動が進む中、安定して食糧生産を行うためには、限られた水資源を有効活用して農業を営むことが重要である。水資源を有効活用するためには、水資源の利用状況を可視化することが必要だが、国内の農業分野では少子高齢化が深刻な問題となっており、農業へ投入できる人的資源が年々減少していくことが予想される。そのため、近年水資源の利用状況を可視化するための農業用センサの需要が高まっている。

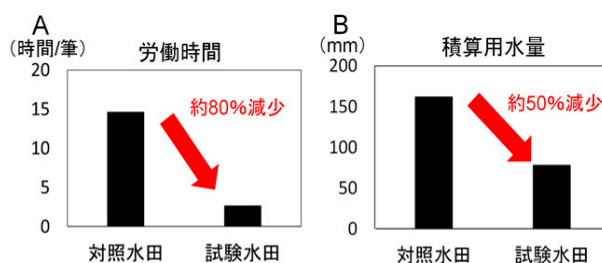


図3 水管理にかかる労働時間と積算用水量の調査結果
調査は2015年、農研機構内の実証水田(各20a区画)において、Aは労働時間(田植～収穫まで)、Bは積算用水量(mm)(出穂期～収穫まで)を示しています。

図 1.1: 水位センサを活用した際の労働時間・水利用量の削減効果 [1]

農業用センサを用いて水資源の管理を行うことで、労働時間の低減と、水利用量の減少を行うことができる。農業用センサによる水管理の一例としては、水田で水管理のために農業用センサを導入することで、水田の水管理にかかる労働時間を約80%、水門を通して消費した水の量を50%削減することを挙げる[1]、その効果の高さをうかがい知ることができる。

水田で水位管理を行う目的の例として、雑草を可能な限り減らすことが挙げられる。水田において効率的に雑草を除去するために、農薬を散布する際の水田水位を3~5cm程度に抑えることで、最も農薬を効果的に散布することができる[2]。また、雑草の成長を抑制するために、水田の水位を10cm程度に引き上げ、雑草の成長を阻害する手法も存在する。

水田の水位は水門からの給水量と排水量によって刻一刻と変化するため、水位を一定に管理するためには、短い周期で水位を取得する必要がある。十数cm程度の水位に対してサブcmオーダーの精度で水位を計測できる水位センサが必要である。

しかしながら、米の価格は、野菜や花などの単価が高いものと比較して安く、水田一つあたりから得られる収益はどうしても低くなりがちである。また、日本の農家の事情として、水田を一つの場所に集約させて営農するような大規模農家の数が少なく、小規模な農家が散在する水田を管理しているような状況である。そのため、一つの水田にかけられる費用には限界があり、現在市販されているような水田向けセンサを小規模な農家が導入することは難しく、水位計の低価格化が重要な課題となる。

1.1.2 防災用水位監視需要

地球の至る所で、水害が多発している。近年地球温暖化の影響で、極地の氷雪が溶け、海面が上昇したり、局地的に大雨となる日が増えたりなど、世界各地で様々な水害が増加しているという報告が存在する [3]。

日本もその例外ではなく、地球温暖化が進むにつれて、今後益々自然災害による水害が増加していくものと考えられる。ここで自然災害を素早く検知し、早急な避難や対応策を打てるようにするために、河川や湖沼を継続してモニタリングする必要がある [4]。

防災のための水位モニタリングでは、河川などの広大な領域の水位を計測する必要があるが、どの場所で洪水が起きたかという情報に関して、粒度を細かく取得するためには多数の水位計を設置して継続的なモニタリングを行う必要がある。

また、河川では農業で用いる水位計とは異なり、数 m から数十 m 程度の範囲を計測する必要があり、これらを数 % の誤差で測定する必要がある。

しかし現状防災向けの継続水位モニタリングシステムを導入するためには、システム全体で数十万円の費用がかかり、非常に高価である [5]。この価格となる理由として、水位計の開発費用や単価が挙げられ、今後水位計を大規模に導入していくためには、水位計の低価格化が重要な課題となる。

表 1.1: 用途別に想定される水位推定範囲

用途	水位計測範囲	求められる精度
水田水位	数 cm ~ 数十 cm	数 cm 程度
河川モニタリング	数 m ~ 数十 m	数%程度

1.1.3 深度選択可能な低価格水位計

本研究では、汎用的なマイコン内部に存在する定電流源を用いて安価に実装できる深度選択可能な水位計の開発について述べる。今回は、静電容量計測を用いた水位計と、Time Domain Reflectometry(時間領域反射計測法, TDR) 法を用いた水位計の二つを開発した。静電容量計測を用いた水位計に関しては、薄膜電極を用いることで大量生産した際のコストを大幅に抑え、また水位計測用のプローブを脱着可能にすることで、1.1.1 節で述べた、水田の水位管理を行えるような、数十センチまでの範囲の水位を精度よく計測できるような水位計を目指す。課題としては、薄膜電極を用いた際、複数の校正電極の静電容量を計測する必要があるが、これを汎用マイコン内部の回路及び安価な汎用 IC を用いて計測した。また計測回路も既に存在する土壤水分計測センサと共用のものとすることで、新たに水位計を導入するコストを抑える。また、この静電容量計測を用いた水位計が実際の使用に耐え得るか調査するために、実際の水田に設置する実証実験を行い、その有効性を検証する。

TDR を用いた水位計に関しては、一般的に入手可能な平行二線を用いた水位推定を、汎用マイコン内部の回路及び安価な汎用 IC を用いて可能にすることで、大量生産した際のコストを抑え、さらに平行二線を設置環境で調整することで、1.1.2 節で述べた、河川や湖

沼における継続モニタリングを行えるような、数メートルから数十メートルに及ぶ範囲の水位を精度よく計測できるような水位計を目指す。課題としては、平行二線を用いて TDR を行う場合、従来は高価な高周波計測回路が必要だったが、今回伝送路上の信号の反射を上手く観測することで、従来汎用マイコンでは計測できないような高速な信号の波形の描画を可能にする。この TDR による水位測定が可能であるか調査するために、実際に平行二線を水に沈め、正確な水位を推定できるか検証する。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は以下である。

第1章 序論

第2章 関連研究

第3章 静電容量計測を用いた水位計の開発

第4章 Time Domain Reflectometry を用いた水位計の開発

第5章 結論

第2章では最新の研究動向と実際に世の中に存在する、継続モニタリング可能な水位推定手法及びデバイスについて紹介する。第3章では薄膜電極を用いた水位計の電極、及び計測回路の設計を行い、実際に茨城県小美玉市、および東大田無にある西東京フィールドで行った実証実験について述べる。第4章では平行二線を用いた TDR による水位測定を可能にする回路について述べ、その有用性を評価する。最後に第5章で本研究についてまとめる。

第2章

関連研究

2.1 はじめに

本章では、水位計測を継続的に行うことを可能にするための無線センサネットワーク、無線センサネットワークにおけるコストを下げるときの低コストセンサの例、及び実際の水位計測技術についての研究や実例について紹介し、本研究における位置付けを明確にする。

2.2 無線センサネットワーク

近年、情報通信技術 (ICT) を用いて様々なものにセンサを搭載し、通信を行うことにより環境情報を得る無線センサネットワーク (WSN) が注目を集めている。継続的なモニタリングが必要な場所に複数のセンサを設置し、その情報を逐次ゲートウェイを通じてインターネットにアップロードし、リアルタイムで環境情報を取得することが WSN の目的である。WSN の応用先は様々な場面に存在する。例えば、農業において世界的な人口増加や、環境の変動に対する懸念から、限られた資源を有効活用するために、農作物及び周辺環境の情報をきめ細やかに取得し、フィードバックを行う精密農業と呼ばれる手法が注目されている [6]。周辺環境の取得のために人手を用いることは経済的に合理的ではなく、WSN を用いて環境情報を取得することが望ましい。また、老朽化したインフラの監視や自然災害による被害拡大防止のために、WSN を構築して継続的なモニタリングを行う例も存在する [7]。この WSN を実現する上で重要なのは、複数設置するセンサ単体の低コスト化、及び WSN 運用の低コスト化である。

2.2.1 低コスト環境情報センサ

WSN を実現する上で重要な課題の一つに、センサ単体のコスト削減が挙げられる。というのも、WSN を構築するには複数のセンサが導入されることが想定されるため、設置するセンサのコストを抑えることは重要な課題である。例えば、農業用センサの一つに土壌水分量を取得するものが存在する。

土壌水分量を推定するためには、乾いた土と湿った土の誘電率の違いから、誘電率を計測することで土壌水分を間接的に推定する必要がある [8]。このため誘電率を計測するために、土中にプローブを差しこんでその静電容量を計測したり、またプローブを伝送路と見立ててその伝送路を解析したりする方法が用いられていた [9] [10] [11] [12] [13]。

しかしながらこれらの方法では高周波を利用するため、解析するための計測回路が高額なものとなり、学術的な目的で計測に用いることはできるものの、一般の事業者が商業のために大規模にこれらのセンサを導入するのは実質的に不可能であった。そこで近年、低価格な土壌水分計を実現するために、薄膜回路実装技術を駆使して薄膜上に静電容量センサを形成し、これを土壌水分計測に用いた低価格土壌水分計を作る試みがなされている [14]。

薄膜回路を用いる理由として、既存のセンサより大幅にコストを抑えてセンサを作成することが可能であることが挙げられる。薄膜回路は、薄膜に電極を実装することで作成可能なので、ロールツーロール方式を用いて薄膜回路を大量生産することができ、センサの製作コストを大幅に抑えることができる。

また、近年静電容量方式を利用したタッチセンサの普及により、汎用マイコンにタッチセンサの読み取り回路が搭載されるようになったため、薄膜回路を用いた土壌水分用電極

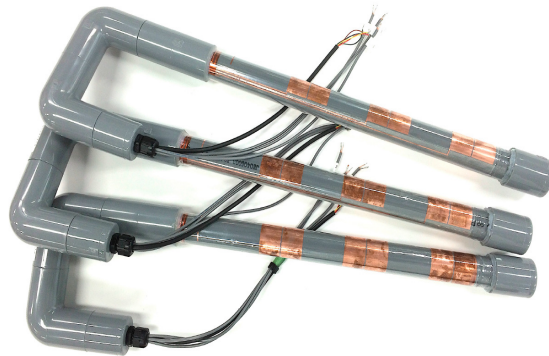


図 2.1: 低価格土壌水分プロファイルプローブ用電極 [14]

と汎用マイコンで土壌水分計を構成することが可能になったことも、低価格化を可能にした一因として挙げることができる。

さらに、導電性銀インクを用いたインクジェット印刷による回路実装技術によって、電極の形状を容易に試作できるようになったため、センサ開発にかかる期間や費用を大幅に抑えることが可能になった [15]。

[14] の手法で作られたセンサは、以前までに用いられてきた土壌水分センサよりは精度は劣るものの、農業用途に使う分には十分な精度を持つため、農業にこのセンサを導入し、導入コストに見合う生産性の向上を見込むことが可能となる。

2.2.2 低コストセンシングのための運用技術

低コストセンシングを行うためには、センサ自身のコストを抑えるのと同時に、センサを運用するコストも抑える必要がある。センサに給電するために電池を用いる場合、センサによっては電池交換が必要なものがあり、交換のための人員もコストに含める必要がある。一方でマイクロ波を用いた無線電力伝送を用いて、無線センサネットワークを運用しようとする試みがある [16]。マイクロ波受信用のアンテナと、整流器を組み合わせたレクテナと呼ばれるものをセンサに搭載することで、マイクロ波給電源から電力を受け取り、センサを駆動させることが可能となる。このときマイクロ波給電源をフィールド上に意図的に設置して、センサを運用することを考えることができるが、フィールドに設置できるマイクロ波給電源の出力範囲の限界や、使用するセンサの消費電力が大幅に低下していることから、近年ではエネルギーハーベストと呼ばれる環境発電技術によってセンサに給電したり、無人航空機 (UAV) にマイクロ波給電源を搭載して、センサに近づいて給電させることも考えられている [17] [18]。



図 2.2: Gamicos 製 100m 水位計測器 [19]



図 2.3: 手動による地下水水位計測 [20]

2.3 継続モニタリング可能な水位推定手法

この小節では継続的に水位をモニタリングするために、人手を介さずに水位を計測するための実際の技術について説明する。水位を観測するための一番原始的な手法は、人の目に依る目視である。従来井戸や地下水の水位を観測するために、距離の書いてあるテープの先端に水検知センサを付け、それを水の入ったパイプの中に入れ、水を検知したときのテープに書かれてある距離を読み取る方式がある [19] [21]。

また、新潟県は圃場において地下水水位を簡易的に取得するために、圃場に穴を掘り、側面に穴の空いたパイプを埋め、側面の穴から地下水をパイプ内に染み出させて水溜り場を作り、そこに長さが書いてある発泡スチロールを挿入することで濡れた部分を目視で確認し、水位を推定する手法を提案している [20]。

しかし目視による水位推定は常に人手を用いる必要があり、運用には常に人的コストがかかる。これを自動化し、人の手のかからない水位計測をするためには、値を読み取る部分を自動化する必要がある。従って、何らかの手法で水位に応じて値が変化するセンサを作成し、その読み取りも何らかの手法で自動化する必要がある。

2.3.1 超音波による水位推定手法

水位を検知するために、超音波による水位計測の手法が存在する。超音波で水位を推定する原理として、超音波を空気あるいは水中から発射し、界面で反射して戻ってくるまでの時間を計測する。このとき超音波の速度 v 、超音波を発射するところから空気と水の界面までの距離を l としたとき、発射した超音波が界面で反射して戻ってくるまでの時間 t は以下のように表せる。

$$t = \frac{2l}{v} \quad (2.1)$$

従って、音の空気中あるいは水中での速度から、反射時間を計測することで水位を求めることができる。[22] や [24] では、河川などの水位モニタリングのために、空気中から超音波を発射し、水面で反射する超音波を観測する。また、[23] では、タンク内部の液体の水

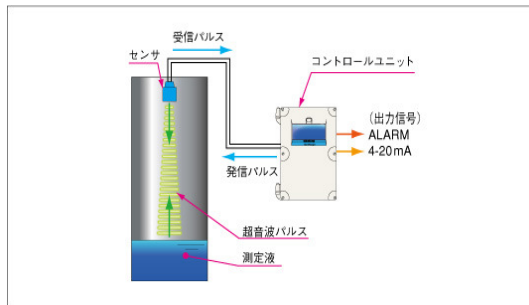


図 2.4: 超音波による水位計測原理 [22]

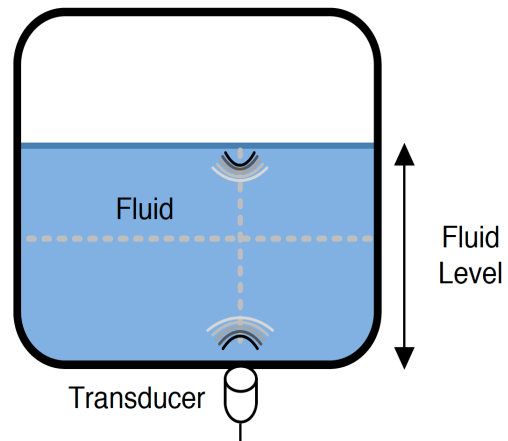


図 2.5: タンクの中の水位をタンク外から超音波を発生し、水位を推定する原理 [23]

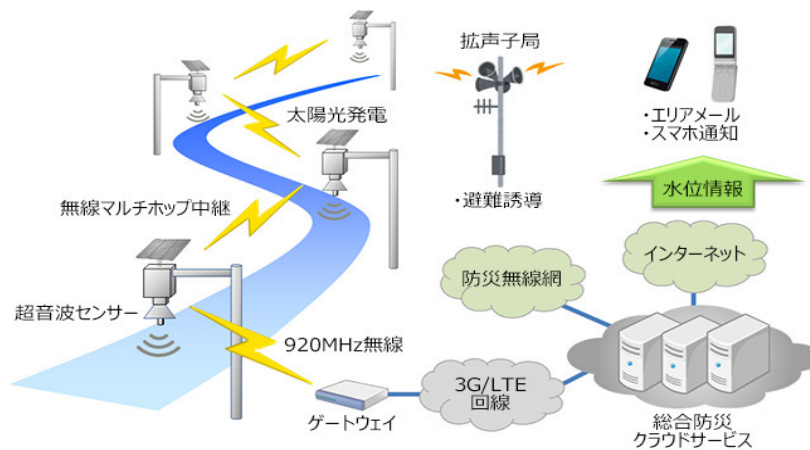


図 2.6: 沖電気による超音波水位計を用いた河川水位モニタリングシステム [24]

位を計測するために、タンクの底に超音波モジュールを取り付け、水中での超音波の反射を観測している。

しかしながら超音波による計測では、対象となる水位からの反射の他に、側面壁に依る反射を誤検知してしまい、正常な水位が計測できない場合がある [25]。特に地下水を計測する際に用いるような狭い管では、超音波が壁面で反射し、正確な計測ができなくなるケースが想定できる。また、界面に達するまでに他の障害物が存在する場合、その障害物に音波が当たって正確な計測ができなくなるケースも想定できる。従って屋外などの障害物が超音波計測器の範囲内に容易に出現するような場所での計測では、向いていないケースも存在する。

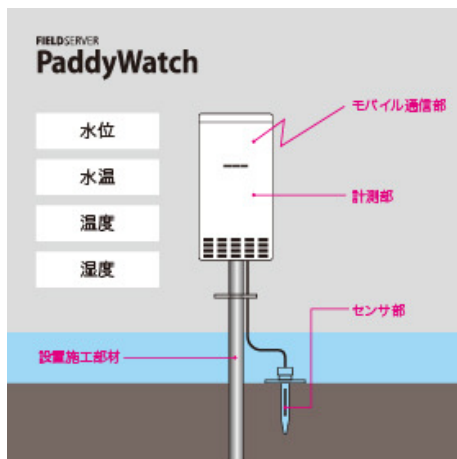


図 2.7: PaddyWatch [26]

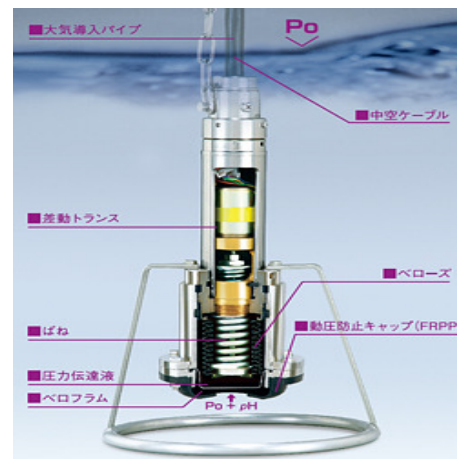


図 2.8: 投げ込み式水位計 [27]

2.3.2 圧力検知による水位推定手法

水位を検知するために、水圧を計測して水圧から水位を推定する手法が存在する [27] [26]。[26] は株式会社ベジタリアが提供している水田に設置するタイプの水位センサであり、NTT ドコモと提携して水位データの取得だけでなくネットワーク上にデータをアップロードし、オンラインで水位データを確認できるサービスを提供している。この水位計測システムは、水田の底に水圧センサを埋め、そこにかかる水圧を検知しており、計測範囲は 0 ~ 500 mm で、全体の長さに対して約 5% の精度で水位を推定できる。センサー一つ一つに 3G/LTE 回線で通信できるモジュールを搭載しているため、ゲートウェイを設置する必要がないものの、センサー台ごとの製造コスト、および回線維持コストがかかる。

[27] は、投げ込み式水位計と呼ばれるタイプのもので、井戸などの細長いところにある水位を計測するのに適している。ここでは、水圧計測機器を底に沈め、上からかかった圧力を計測する。このとき水圧 P は水の密度 ρ 、水の高さ l を用いて $P = \rho l$ と表すことができる。従って、事前に計測された水圧と水位の関係を元にすれば、得られた水圧から水位を推定できる。このとき水圧を計測するために、先端にバネを取り付け、バネの変位を電圧に変換する。この電圧を読み取ることで、バネの変位を計測できるため、そこから水位を推定できる。このとき、水位を全体の計測範囲に対して 0.2~0.5% で計測でき、精度のよい計測ができるが、計測のためにバネなどの機械的な部品が多く必要なため、機械部品の故障が懸念される。また、バネの変位を計測するためにトランスなどの回路が必要であるため、計測に比較的多くの電力が必要となり、電源確保などの運用面でのコストが増加する。

2.3.3 静電容量方式を用いた水位推定手法

水位を検知するために、電極の空気中と水中での静電容量の違いを利用する手法が存在する。図 2.9 に、電極を用いて水位を計測する様子を示す。図 2.9 に描画されているような形状をした電極を楕形電極と呼び、縦に走る二本の細長い線ここで電極は二つの部分に分かれており、この二つの電極に電圧をかけると、二つの電極の間に電界が生じる。離れ

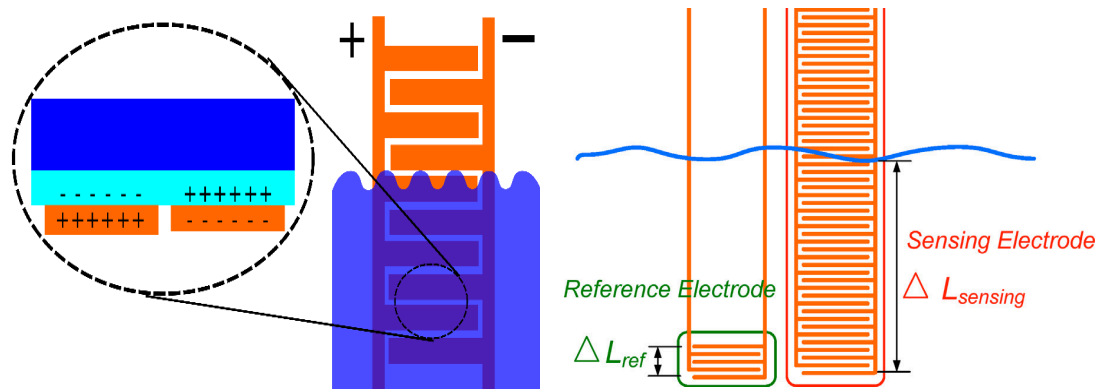


図 2.9: 平面上に実装した楕形電極. 電極と水の間でキャパシタが形成される. 図 2.10: 水位計測のためのリファレンス電極と水位計測用の電極 [28]

た二つの電極に電圧をかけると、二つの電極の間に電界が生じるため、電極の間に静電容量が発生する。また、電界が生じる領域の誘電体に変化することにより、静電容量が変化する。そのため、空気の比誘電率がほぼ1で、水の比誘電率はおよそ80となることを考えると、そのため電極が水と接したとき、空気と接しているときと比べて、静電容量が増加したように観測される。従って、同じ形状の電極であっても、空気中に存在するときと比較して水中に存在するときの静電容量の方が大きい。

通常、静電容量方式で水位を計測する場合は、実際の環境に合わせて、静電容量を校正する必要があるが、Chetpattananondhらは、校正用の電極を別に加えることで、実際の環境に設置しただけで校正を可能にし、即座に水位計として利用できるようにした [28]。

しかし、ここでセンサの低コスト化を図るために静電容量センサを薄膜電極で実装することを考えた場合、校正用の電極までの配線に静電容量が載るため、正確な水位が計測できないという問題点が生じる [29]。そのため Tungらは薄膜電極で正確な水位を計測するために、配線部分の静電容量を取り除く手法を提案し、水位計測における誤差を低減した [30]。

しかしこの手法では計測する電極が多くなり、マイコンで静電容量を計測することを考慮していない。実際に低コストで製作できる薄膜電極を用いた水位計を製作するためには、マイコンで多くの電極の静電容量の値を計測することを考慮する必要がある。

2.3.4 TDR を用いた水位推定手法

TDRとは、伝送路にパルスやステップ信号を入力して、その反射波形及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、入力した信号の反射は起こらないが、何らかの原因でインピーダンスが不連続に変化した部分が存在した場合、その界面で波形が反射する。この反射波を時間領域で観測して、反射波の特性を調べることにより、伝送路の状況を推定するのがTDRの原理である。TDR方式を利用して水位を読み取る場合、金属製のプローブが伝送路としてよく使われる。このとき、プローブの形状は、二本の金属棒を平行に置いたり、細い金属棒を金属の筒の中に入れたりなど、様々なものが提案されている [34] [35] [36] [37] [38]。

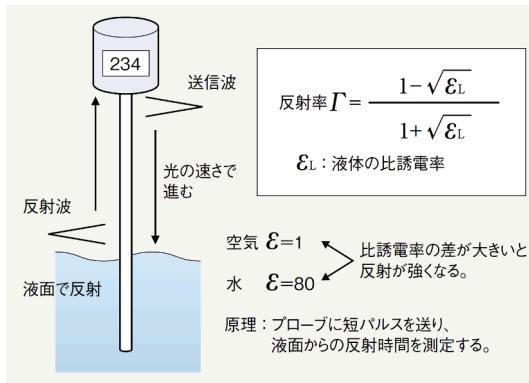


図 2.11: TDR による水位計測原理 [31]

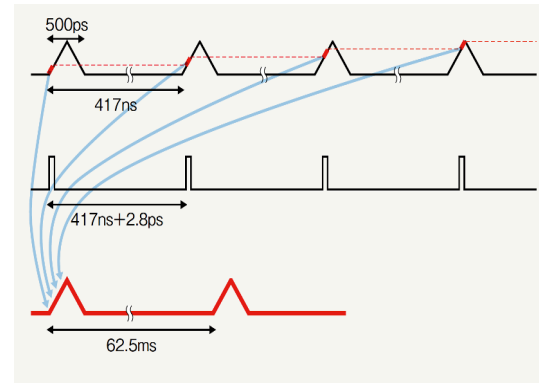


図 2.12: TDR による水位計測の際の波形サンプリング手法 [31]

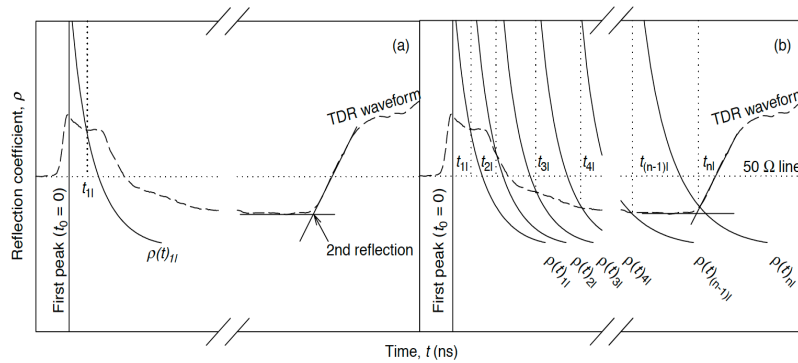


図 2.13: TDR による土壌水分量推定手法 [32]

TDR で信号を計測する際、信号波形を時間領域で観測するために一定周期で信号のサンプリングを行うが、プローブの長さが短い範囲ではプローブを伝播する信号が早すぎて、信号のサンプリングができない可能性がある。

そこでサンプリングオシロスコープで用いられるような、入力されている信号の周波数より僅かに低い周波数でサンプリングを行い、位相を少しずつずらしながら波形を再生する [39] 手法を用いて信号をサンプリングし、通常のサンプリング周期で取得できる信号よりもはるかに高速な信号を取得する手法で水位を計測するものが提案されている [31] [40].

また TDR は伝送路全般の解析が行えるため、水位のような界面で反射が明確なもの以外の計測にも用いることが可能である。例えば、[32] では土壌水分量を TDR により解析しており、一つのプローブで複数の深度の土壌水分量を推定する手法を提案している。

TDR 方式で水位を読み取る場合、プローブの間の領域の誘電率が特性インピーダンスに影響するため、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く、静電容量方式と比較して外乱に強いという特徴がある。

しかし従来 TDR を用いて水位を計測する場合、TDR に用いられる回路は、ナノ秒オーダーで信号をサンプリングして波形を再現し、その波形を解析するものであるため、TDR 解析に必要な計測回路が高価となり、水位計の価格が非常に高額になるという問題点が生

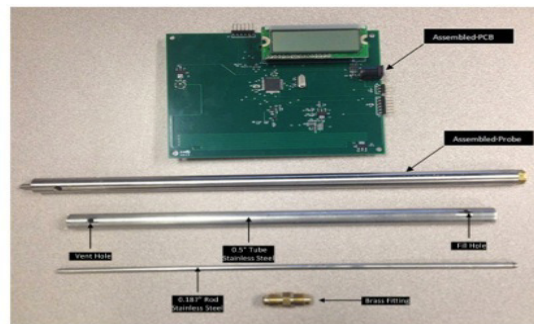


Figure 1 TDR Level-Sensing Components

図 2.14: PIC による反射時間を計測した水位推定手法 [33]

じる。

また, [33] では, 金属パイプを用いた伝送路を作成し, 側面に穴を開けて水を入れ, また PIC を用いて伝送路上の反射時間を計測することで水位を計測する手法が提案されている。この手法では水位推定に高周波などの高価な回路を用いず, PIC 内部の Charge Time Measurement Unit (CTMU) を用いることで, 伝送路の反射を計測している。また, 水が入ってない状態での特性インピーダンスを 50Ω にし, 回路上のマイクロストリップラインと整合させることで, 空気中に存在する伝送路の長さを長くし, 空気中の伝送路の長さを計測することで水位の計測を可能にした。ただしこの手法では金属製プローブを用いるため, 数十センチ程度の水位の計測であれば可能なものの, それ以上の範囲の水位の計測は, 金属製プローブの加工精度を考えた場合困難となる。

2.4 まとめ

本章では, まず 2.2 節で WSN を構築する上でのコストを述べ, WSN の低コスト化のための技術や運用コストを下げるために提案されている技術について述べた。

その後節 2.3 節で継続的水位モニタリングを可能にする技術について述べ, 既存の水位モニタリングデバイス及びシステムについて, 超音波方式による計測は既存の水位モニタリングシステムが, 継続的に人手を介さず水位を計測できることを示しつつ, 超音波による計測では計測可能条件の制約が多いこと, 水圧式では機械的な故障や計測設備の大規模化など, 低コストな WSN 構築のための課題が存在することを示した。また, 静電容量方式や TDR 方式による水位計測では, 静電容量方式ではマイコンによる静電容量計測のための課題が存在し, TDR 方式では回路のコストの問題や, 金属製プローブを用いることによる計測範囲の問題が生じる。

以上のことを踏まえ, 本稿では水位モニタリングを行う WSN の低コスト化のため, センサ単体のコストを下げることを目指す。また, 計測可能条件の制約や機械的な故障, 計測に必要な設備の大規模化を避けるために, 静電容量方式や TDR による水位の計測手法を用い, 金属製プローブのような計測範囲が限定されたものでなく, 様々な範囲の水位を計測できるようにするためのプローブを用いることを可能にするための手法を確立する。

3章では静電容量方式を用いた水位センサを作成し，マイコンで複数の電極を計測するための回路を設計し，実際の圃場で運用した結果を報告する．また，4章では，TDR方式による水位計測手法を確立するための回路及び手法について説明し，水位の計測結果について報告する．

第3章

静電容量計測を用いた水位計 の開発

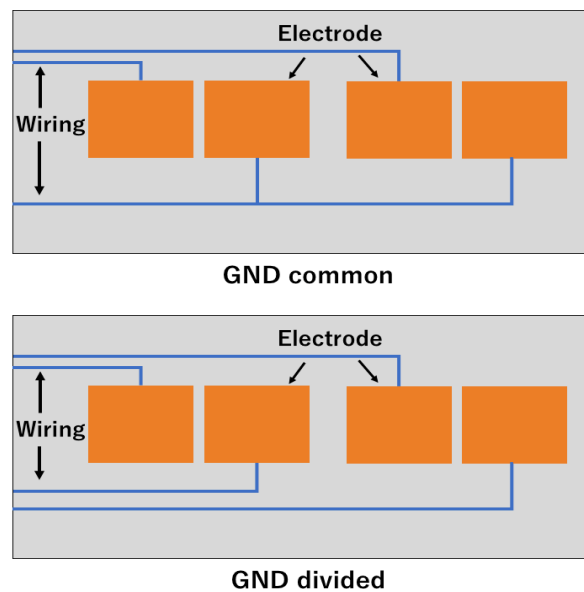


図 3.1: (上)GND を共通にした薄膜上の電極 (下) GND を分離した薄膜上の電極

3.1 はじめに

本稿では2章で述べた背景を踏まえて、水田水位の計測が可能となる計測回路及び計測用プローブを提案し、実際に水田水位を計測するための水田水位計測プローブを薄膜実装で作成して実証実験を行なうことでその有用性を示す。

3.2 計測回路及びプローブ設計の際の課題

3.2.1 子機に関するコスト

環境情報を取得して利用可能にするためには、取得したセンサ情報をインターネット経由でデータベースにアップロードする必要がある。そのため圃場にインターネットに接続可能な機器を設置する必要があるが、機器のコストを考えると、インターネット接続可能な親機と、センサデータを取得して親機に情報を送る子機の間でセンサネットワークを形成するのが合理的である。従って多くの場合では圃場には子機を多数設置するため、子機のコストを抑えることが環境情報を取得する際に重要な課題となる。圃場に設置する子機は、実際に圃場の環境をセンシングする部品以外にも通信モジュールや電源回路など様々な部品を搭載しており、これらを組み合わせて設計する必要がある。また、圃場の多種多様な環境情報を取得するためには、様々なセンシングモジュールを搭載した子機を設置する必要がある。従って多種多様なセンシングモジュールを搭載した子機の開発コストを下げするためには、計測用プローブ以外の構成を共通化し、計測用プローブを容易に取り替えることのできる設計にする必要がある。

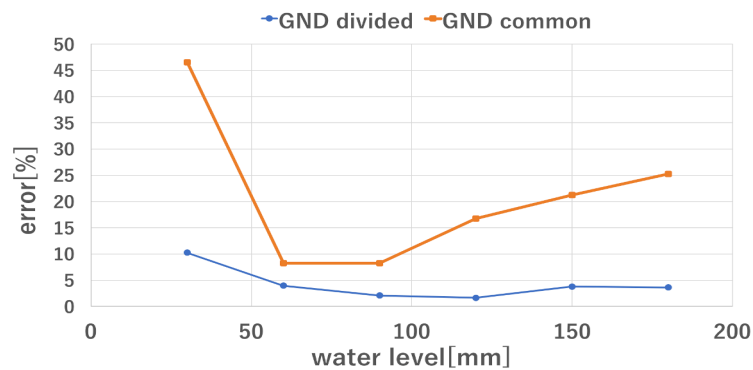


図 3.2: GND が共通である水位計と、GND が分離された水位計による、水位の計測誤差を表したグラフ

3.2.2 薄膜上の配線間容量除去

薄膜上に電極を実装して静電容量センサとして動かす際、電極と計測回路をつなぐ配線が必要であるが、パッケージの都合上図 3.1 のように薄膜上に配線パターンを描く。このとき、配線部分にも静電容量が存在するため、電極上の静電容量を正しく計測するためには配線パターンの静電容量を除去する必要がある。そこで繁田らは、薄膜上に電極へ繋ぐ配線パターンと同じ形状のパターンを別に作り、配線パターンにより生じる静電容量を除去する手法を提案した [29]。また、静電容量センサは二つの電極から構成されており、片方は回路の GND 部に繋がるが、ここで図 3.1 の上図のように電極の GND 部を共通化した際、それぞれの電極に共通 GND 部からノイズが載り、正しい静電容量が計測できないという問題がある。

図 3.2 に、GND が分離された電極と、GND が共通になった電極で水位を計測した際の誤差を示す。この実験では、水位を 30 mm から 180 mm まで 30 mm 刻みで水位を変えた際にそれぞれのセンサで水位を推定し、その値が真の値からの誤差をパーセントで表すものである。その結果、GND を分離した状態では、水位が 30 mm の際に最大 10% の誤差が観測され、他の水位では数%程度の誤差が観測された。一方、GND が共通の状態では、水位が 30 mm の際に最大 45% の誤差が観測され、その他の水位で 10~25%程度の誤差が観測された。したがって、静電容量計測による水位推定では、図 3.1 の下図のように、静電容量センサの GND 部を分離することが重要である。

しかし、静電容量センサの GND を分離する際、使用するマイコンの I/O ポートが増大するという欠点がある。例えば、土壌水分センサを用いて 3 つの深度における土壌水分量を計測する場合電極が 3 つ必要となるが、GND を分離すると計 6 本の入力ポートが必要となる。さらに、前述の配線パターンの静電容量を除去する際にも、同じ入力ポートが必要となるので、計 12 本の入力ポートが必要となる。従って、薄膜上の電極を用いた静電容量センサは非常に多くの入力ポートを用いるので、出来るだけ入力ポートを多く持った回路が必要である。



図 3.3: 計測回路と差し替え可能な計測用プローブ

3.3 静電容量計測回路及び水田水位計測プローブの設計

3.2 節で述べた課題を踏まえ、計測プローブを差し替え可能にし、安価なマイコンによる静電容量を計測する回路及び水田水位計測用にセルフキャリブレーション可能なプローブの設計を行ったのでこれを紹介する。

3.3.1 安価なマイコンを用いた静電容量計測回路

今回静電容量を計測するために、Microchip 社のマイコンである PIC24FJGB002 の Charge Time Measurement Unit (CTMU) を用いて静電容量を計測した。CTMU は PIC の I/O ポートから定電流を一定時間流すことができるモジュールで、今回は電荷が溜まった静電容量センサの電圧を計測することで静電容量を計測する。静電容量は、定電流 I 、流した時間 t 、静電容量センサの電圧 V を用いて以下の様に表せる。

$$C = \frac{It}{V} \quad (3.1)$$

したがって、定電流 I 、流した時間 t が与えられた際、静電容量センサに生じる電圧 V を観測することで間接的に静電容量 C を推定できる。また、今回計測回路を共通化して子機の開発コストを下げるために、計測用プローブを差し替え可能にした。図 3.3 に計測回路を内包した筐体とプローブの写真を示す。右上の白い筐体が計測回路であり、左の長いプローブが水位計測用のプローブで、中央のプローブが土壌水分計測用のプローブである。右上の筐体にはプローブの差し込み口が存在し、プローブの薄膜上の端子が計測回路と接触することにより、計測回路とプローブが電氣的に接続して計測可能となる。

3.3.2 セルフキャリブレーション可能な水田水位計測プローブ

本小節では、薄膜実装した静電容量センサを用いた水田水位計測プローブを実装したのでこれについて説明する。

図 3.4 に今回実装した薄膜による水田水位計測プローブを示す。今回は Tung らの実装を参考に、現在 SenSprout 社から発売されている SenSprout Pro で使用されている土壌

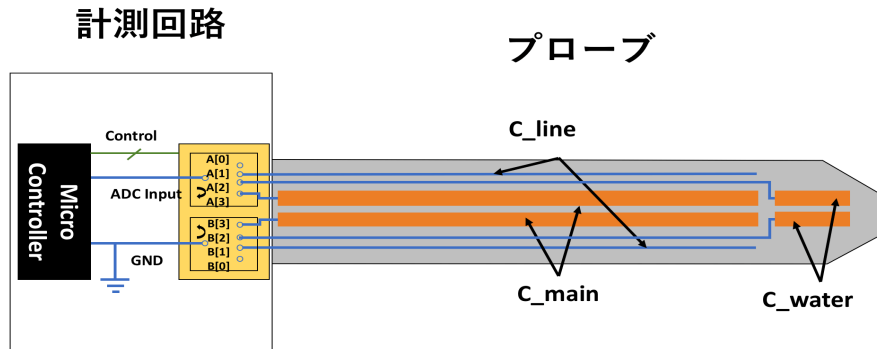


図 3.4: 今回実装した水位計子機の概要図

水分センサのプローブと互換性のある板に水位計測用の薄膜を張り付けた。これにより、SenSprout Pro と同様の計測回路を用いて、水位を計測することが可能となる。また、プローブを脱着可能にすることで、様々な形状のプローブを差し替え可能である。そのため、設置環境に合わせた形状のプローブを作成し、それを用いて水位計測を行うことができる。図 3.4 の C_{main} が水位計測用の静電容量センサで、 C_{water} が水中における静電容量計測用のセンサ、 C_{line} が C_{water} に繋がる配線部分の静電容量を計測するセンサである。これら 3 つの静電容量の値が与えられ、さらに C_{water} を表す電極の長さが r 、 C_{main} を表す電極の全体の長さが h で与えられたとき、水位の高さ l は以下の式で表すことができる。

$$l = \frac{C_{main}r}{C_{water} - C_{line}} \quad (3.2)$$

従って、3 つの静電容量を計測することで、以上の式を用いることで水位を計測することが可能となる。また、今回水中で顕著となる共通 GND によるノイズを防ぐため、静電容量センサの GND を全て分離した。このとき、一つの静電容量センサに必要なマイコンの入力ポートは 2 つとなるが、今回のように静電容量センサが 3 つ存在すると、必要な入力ポートは 6 つとなる。

このためマルチプレクサを用いて入力ポートを増大させ、静電容量センサに必要な GND 部の分離を行い、静電容量計測を使用可能にする回路を実装したのでこれについて説明する。

図 3.4 の左にセンサ読み取り部の回路図を示す。今回用いたマルチプレクサは 74HC4052 であり、4ch のマルチプレクサである。4ch のマルチプレクサは 4 つの入力ポートを、2bit の制御ピンの状態を変えることで 1 つ選択し、1 つの出力ピンに繋げることができる。さらに 74HC4052 はこの 4ch のマルチプレクサの回路を 2 つ内在し、共通の制御ピンで動かすことが可能である。例えば入力状態が '0b01' の際、図 3.4 の $A[1]$ が A_{OUT} に、 $B[1]$ が B_{OUT} にそれぞれつながる。今回の計測回路ではこれを利用して、マルチプレクサの入力ポートをセンサ部分に繋ぎ、出力ピンを、片方をマイクロコントローラの I/O ピンに繋ぎ、もう片方は計測回路の GND に繋いだ。

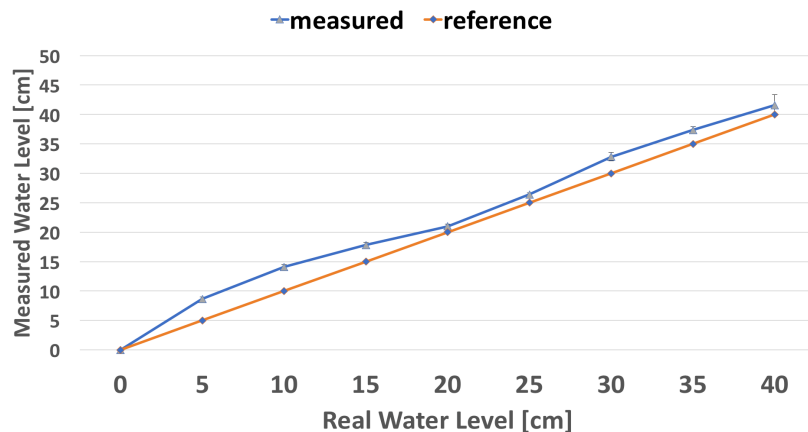


図 3.5: 今回実装した水位計の実験室における計測結果

以上の設計によって、複数の電極による静電容量計測が可能となったため、水田水位を計測することが可能となる。

3.3.3 実装した薄膜実装水位センサの計測精度

今回圃場に水位計を設置する前に、実際の圃場での使用を予定している水田水位計測プローブおよびマルチプレクサを用いた計測回路による計測精度の確認を実験室で行った。

今回は $50 \mu\text{A}$ の定電流を $0.625 \mu\text{s}$ 流し、その際静電容量センサにかかっている電圧を PIC 内部の 10 bit AD コンバータを用いて計測した。今回実装した水田水位計測プローブは、 $50 \mu\text{m}$ の PET 板の上に $35 \mu\text{m}$ の銅箔を用いて静電容量センサを実装した。メインの計測部を表す電極 l は 40 cm、校正用電極の長さ r はそれぞれ 4.45 cm とした。今回の実験では、40 cm の電極を用意し、5 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、その平均値をその水位における推定値として扱った。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。

図 3.5 に水位を推定した結果を示す。グラフの measured は実際に静電容量を用いて水位を推定した値を示し、reference は真の値を示すため、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することができる。結果、水位が 0 cm から 15 cm のときの推定誤差は 2 ~ 4 cm となったが、25 cm から 40 cm のときは誤差が 1 cm ~ 2 cm となった。また、10 回計測した際の値のばらつきの標準偏差に関しては、20 cm までは 0.5 cm 未満だったが、25 cm あたりから標準偏差が増え、40 cm の際は 1.8 cm と大幅に増加した。

今回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 cm 以下の際に、配線の静電容量を計測する際に ADC の値が飽和してしまったために、校正用の電極の静電容量を低めに見積もり、その結果水位を高めに見積もってしまったと推定することができる。

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の標準偏差が増えた原因に関しては、次のことが考えられる。マイコンで静電容量を計測する際は、式 (3.2) の

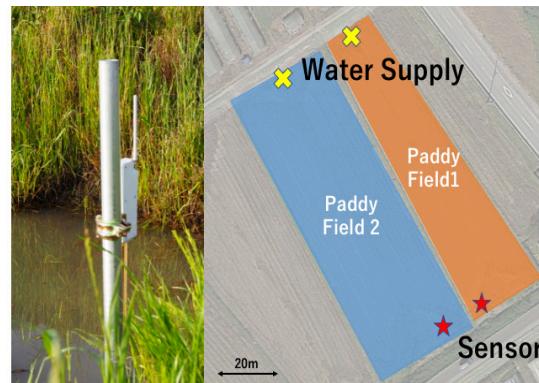


図 3.6: 茨城県小美玉市における水位計設置状況（地図は Google Map より）

ように電圧から静電容量を計算するが、このとき水位が高くなる、すなわち電極に触れる水の面積が広がって静電容量が高くなると、ADC で計測される電圧は低くなる。その際 ADC の量子化誤差などの影響で、 V に誤差が生じた場合、得られる静電容量に生じる誤差が、低水位のときと比べて大きく異なるため、水位が高くなるにつれて計測した値のばらつきの標準偏差が大きくなると推測される。

3.4 薄膜実装水田水位計の実証実験

本節では 3.3 節で提案した薄膜実装による水田水位計測プローブ及び計測回路を用いた水田水位センサを用い、実際の圃場で水田水位を計測した際の結果について説明する。今回実際の圃場に水位計を設置し、稲作において有用な環境情報が得られるかどうかを調べるために実証実験を行なった。また、今回使用する計測回路は SenSprout 社が提供するゲートウェイを通じてデータベースに土壤水分量の情報を逐次記録することで、Web ブラウザ上から現地の土壤水分量の値をリアルタイムで観測することができる。今回このデータベースを流用して、水田水位の情報を記録させることで、土壤水分量の情報と同様に水位をリアルタイムで観測することも可能にした。

3.4.1 茨城県小美玉市における水位センサの運用

今回開発した水田水位プローブの有効性を調べるために、茨城県小美玉市に所在する水田を借りて実地実験を行なった。実施期間は、2017 年 5 月 18 日から 2017 年 6 月 29 日の 1 ヶ月であった。今回、水田における水位が一定に保たれているかということについて着目した。水位計は水田の排水口付近に設置し、1 時間おきに水位の情報を取得した。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ということ調べた。今回水位計を設置する際、水田の水位は 5~10 cm 程度で、当初そのまま設置した状態だと、キャリブレーション用の電極のみが水中に浸かる状態となり、水位を計測するメインの電極に水が触れない状態となったが、キャリブレーション用の電極を、水田の土に挿した状態で水位を計測したところ、セルフキャリブレーションが機能した状態で水位を計測することができたので、今回はキャリブレーション用の電極を水田の土に

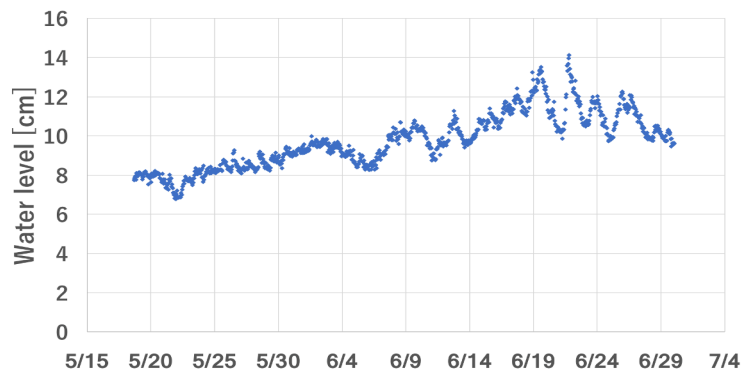


図 3.7: 茨城県小美玉市における水田 1 の水位計の結果

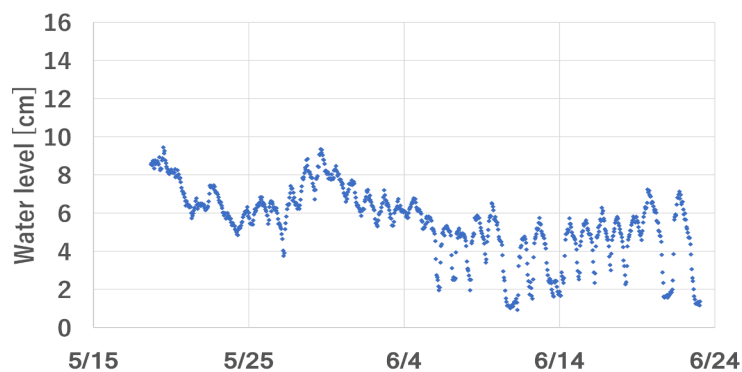


図 3.8: 茨城県小美玉市における水田 2 の水位計の結果

挿した状態で、水田の底の土から水面までの水位を計測した。図 3.7 及び図 3.8 に結果を表す。図 3.7 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、それ以外の日では一日の水位の変化は 1 cm 程度に収まっており、水位計の誤差を考えてもほぼ水位が安定していると考えることができる。

一方図 3.8 の水田 2 では比較的短期間で水位の上下が激しく、6 月の後半では一日で水位が 3 cm 程上下する日々が続いた。実際この水田では、早朝に水田に水を入れ、夕方水を止めることを行っているが、実際水を入れている日中は水位が上昇しているものの、夕方から夜にかけて水位が下がっているため、水を入れてない夜に水田から水が抜け落ちたことがわかる。以上より、同じ地域の水田でも水位の変動が異なることや、水田の水持ちの良さ、悪さなどをこの水位計から読み取ることが可能となることが明らかとなった。

3.4.2 田無における水位センサの運用

7 月から 8 月の夏の間の水田水位を計測するため、東京都西東京市田無における東京大学が所有する水田に水田水位計を設置した。図 3.10 に田無で計測した水位の結果を記す。この水田では、7 月から 8 月前半にかけては、中旬に除草剤を散布する目的で水を止めていたものの、基本的には水を入れ続けていた。7 月のデータを見ると、7/18 は東京で大雨

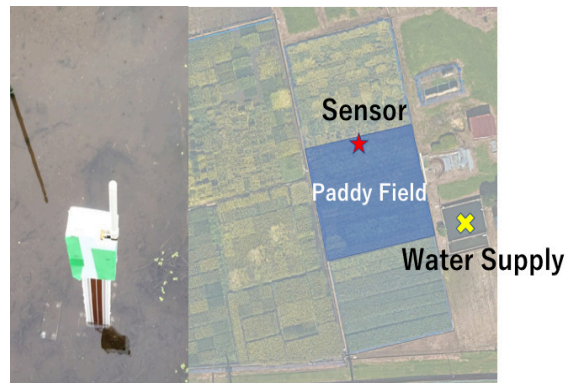


図 3.9: 田無における水位計設置状況（地図は Google Map より）

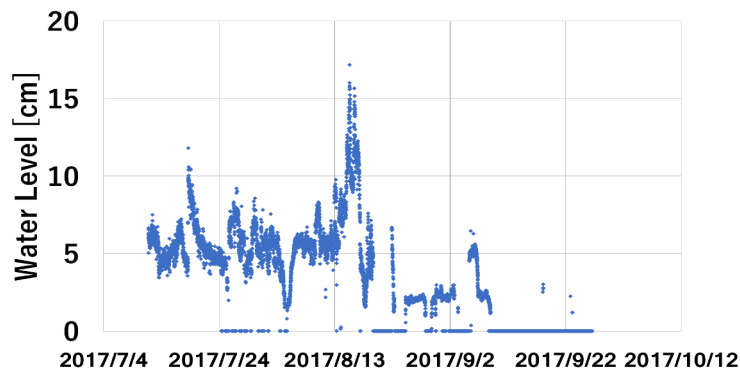


図 3.10: 田無における水位計の結果

が降った日で、大幅に水位が上昇しているのが観測できるが、それ以外では水位は 4 cm から 8 cm の間を推移した。水位は 1 日周期で変化しており、短期間で水位が変動しているのが観測できた。先程の茨城県小美玉市の水田 1 と比較すると、短期間で水位が変動していることが読み取れた。短期間で水位が変動することは稲作の生育的に不利な条件となり、田無で稲作を行う場合は短期間で水が抜け落ちないための工夫が必要であることが水位計のデータから読み取れた。一方 8 月後半から 9 月の前半では、間断灌漑により水田に水が存在しているときと存在していないときがあった。8 月の中旬に大雨が降った日があり、水位が急激に上昇して水位計がエラーを吐いてデータが観測できない日が存在したものの、それ以降間断灌漑により水位が減少して水位が 0 cm になった時期が観測できた。そして 9 月の後半では完全に水を絶っていたため、水位が 0 cm となり、実際にセンサでも水位が 0 cm になったことが観測された。

3.4.3 実証実験で明らかとなった課題

今回の実証実験で水位計の課題も明らかとなった。今回設置した水位計は、計測できる範囲は 40 cm まで広いものの、実際の水田で必要な水位の計測範囲は、およそ 5 cm ~ 10 cm 程度となり、水位計としての高さは必ずしも必要とされていなかった。むしろ水位計

が高くなりすぎることによる弊害として、強風に煽られてセンサが曲がり、正しい水位が計測できない可能性があることも考えられる。ただしプローブ短すぎることで今度は水位計が水中に水没することも考えられるため、水田計測に最適なプローブの長さを算出するためには慎重な検討が必要である。また、セルフキャリブレーションする際に必要なキャリブレーション用の電極について、キャリブレーション用の電極が動いてないにも関わらず、水位計測用の電極が動き、正しい水位が計測できない場合が存在した。これは水位が下がる局面で、プローブの表面に水滴が残っていた可能性や、プローブに貼り付けた薄膜に浸水するなどして電極が反応し、正しい水位が計測できていなかった可能性がある。

3.5 まとめ

本章では、農業向けのセンサを作る際に、センサの設計コストを抑えるために、既存の土壤水分用のプローブや、今回新たに設計した水田水位用プローブなど多用途な計測が可能な回路を設計した。また、この回路を用いて実際に水田水位計測用のセンサを作り、実証実験を通じて稲作にとって有用な情報が得られることを明らかにしたと同時に、運用についての様々な課題を洗い出した。

■ 第4章

Time Domain Reflectometry を用いた水位 計の開発

4.1 はじめに

本章では平行線路に入力された信号の反射時間から水位を計測することで、実際の運用に耐え、かつ安価な計測回路を用いた低価格な水位計を提案する。

4.1.1 平行線路における反射時間と水位の関係

今回提案する水位計のプロブとして、従来提案されてきたステンレス製の専用のプロブではなく、フィーダー線と呼ばれる平行線路を利用する。平行線路は、二本の導線を平行に配置させることで、二線の間隔及び線の太さで特性インピーダンスを調整できるものである。平行線路は構造が単純で、かつてテレビ信号線として使われていたこともあり、低コストで入手が可能な一方、同軸ケーブルなどの伝送路と比べると、外部環境の影響を受けやすいという特徴がある。そのため、この平行線路の外部影響の受けやすさを利用し、水位によって伝送路の状態が変化することを利用して、伝送路の状態から水位を推定することができる。また、設置する環境に合わせてフィーダー線の長さを調節することで、現地で計測したい水位の範囲を自由に定めることができるため、環境依存性を低減することができる。

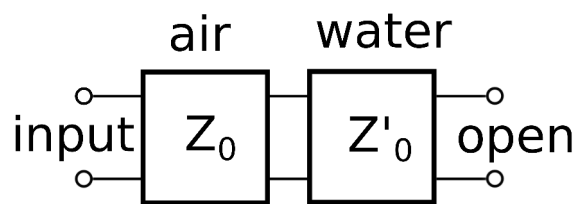


図 4.1: 平行二線伝送路が空气中に存在するときと水中に存在するときの回路モデル。空気と水の境界面、及び終端の開放部で、伝送路の特性インピーダンスが不連続に変化するため、信号の反射が起こる。

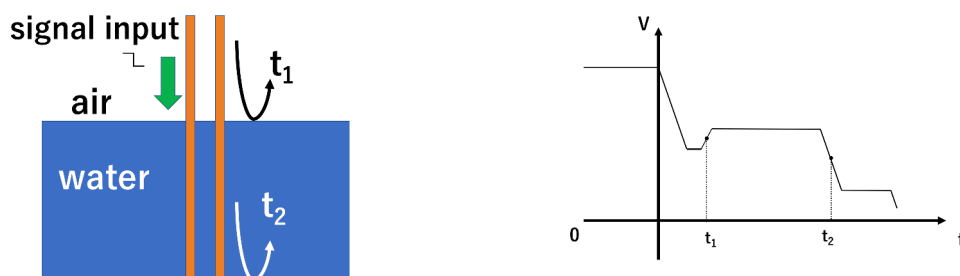


図 4.2: TDR による水位計測。右のグラフは時刻 $t = 0$ にステップ信号を入力端に入力したときの信号レベルを時系列で表している。

空気中と水中の両方に伝送路が存在する場合、図 4.1 のように、特性インピーダンスの異なる二つの伝送路が接続されているものと考えることができる。図 4.1 の回路を考えたとき、特性インピーダンスが不連続に変化する場所が、空気と水の境界面、及び終端の開放部に存在する。

図 4.1 のように、空気中の特性インピーダンスを Z_0 、水中の特性インピーダンスを Z'_0 としたとき、空気と水の界面における反射係数 ρ は以下ようになる。

$$\rho = \frac{Z'_0 - Z_0}{Z'_0 + Z_0} \quad (4.1)$$

ここで平行線路の特性インピーダンスは、周囲の誘電率が高くなるほど減少する。水の比誘電率は空気の比誘電率より高いため、水中に存在する伝送路の特性インピーダンスは空気中に存在する伝送路の特性インピーダンスより低くなる。従って式 4.1 の反射係数 ρ は負の値をとるため、この界面の反射波が伝送路の入力端に戻ってきた際、電圧は一旦下がる方向に動く。また、終端を開放している場合、ここでも反射が起こり、反射係数は 1 となる。従って、終端での反射波が伝送路の入力端に戻ってきた際、電圧は上昇する方向に動く。

また、伝送路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 ϵ_s 、比透磁率を μ_s とすると、

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\mu_s \epsilon_s}} \quad (4.2)$$

となる。ここで空気と水について、比透磁率は両者ともほぼ 1 であるが、比誘電率は空気がほぼ 1 なのに対し、水はおよそ 80 となる。

従って式 (4.2) より、水中に存在する伝送路では信号の伝搬速度が遅くなるため、水中に存在する伝送路の部分が長いほど、終端での反射波が入力端に戻る時間が伸びる。

図 4.2 に、平行二線が空気中、及び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、水中の終端でも入力信号は反射し、時刻 t_2 に入力端に戻る。

ここで伝送路全体の長さを L 、水位の高さを l 、伝搬する信号の空気中、水中での速度を v, v' としたとき、 $t = 0, t_1, t_2$ の関係は以下ようになる

$$t_1 = \frac{2(L-l)}{v} \quad (4.3)$$

$$t_2 - t_1 = \frac{2l}{v'} \quad (4.4)$$

$$t_2 = \frac{2(L-l)}{v} + \frac{2l}{v'} \quad (4.5)$$

$$= \left(\frac{2}{v'} - \frac{2}{v}\right)l + \frac{2L}{v} \quad (4.6)$$

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 から l を推定することが可能となる。

また、 v, v' が単体でわからない場合であっても、式 (4.6) より、 l と t_2 の変位の関係は以下ようになる。

$$\frac{\Delta l}{\Delta t_2} = \frac{2}{v'} - \frac{2}{v} \quad (4.7)$$

従って、複数深度で $\frac{2}{v'} - \frac{2}{v}$ のパラメータ及びある一点における l と t_2 の対応を記録しておくことで、計測した t_2 から l を推定することが可能である。

実際には、作成した水位計で複数深度で反射時間を表す A/D コンバータの値を取得し、その近似曲線を作成して、 $\frac{2}{v'} - \frac{2}{v}$ 及び $\frac{2L}{v}$ を得る。

また、このパラメータを用いて、式 (4.6) を変形した

$$l = \frac{t - \frac{2L}{v}}{\frac{2}{v'} - \frac{2}{v}} \quad (4.8)$$

を用いることで、近似曲線から得られたパラメータ、及び反射時間 t を用いて水位 l を推定することができる。

ここでこの手法を用いて水位を推定する場合、計測する水位の範囲において、上昇した水位に応じて反射時間が線型に増える必要がある。従って、今回作成する水位計の水位と反射時間の関係が、どのような水位の範囲でどの程度の線型性を持つか、という情報は非常に重要なものとなる。

4.2 VNA による反射時間計測

平行二線を伝搬する信号の速度が空気中と水中で変化することを確かめるため、VNA を用いて伝送路の特性を計測し、伝送路に信号を入力した際の反射した波形を推定した。また、反射した波形から、空気中を伝搬する信号速度、および水中を伝搬する信号速度を求めた。

通常 VNA は周波数領域で伝送路の特性を出力するが、VNA に搭載されている逆 FFT 機能を用いることで、周波数領域の計測データから時間領域の計測データに変換することが可能であるため、この機能を用いて時間領域で信号波形を描画した。

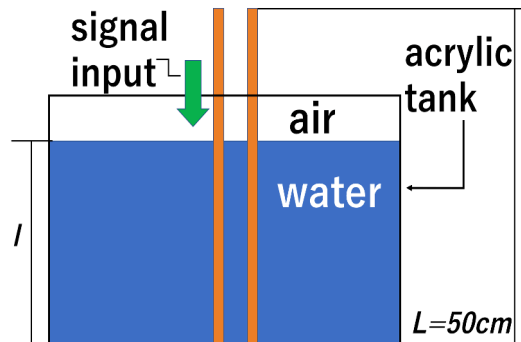


図 4.3: 実験で用いたフィーダー線と水位の関係

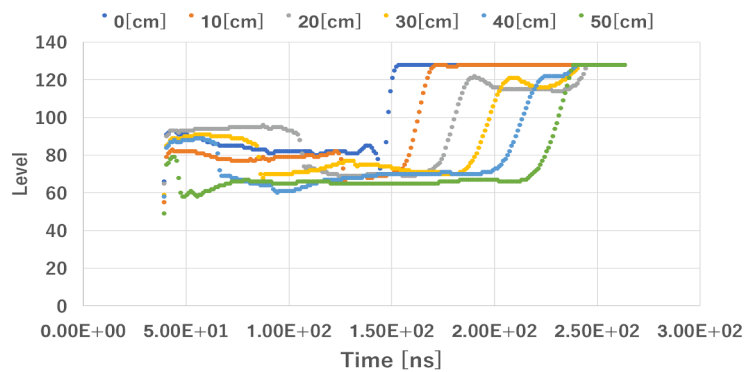


図 4.4: VNA による平行二線の計測結果

4.2.1 実験環境

本実験では、平行二線上を伝わる信号の反射及び水中での信号の遅延が起こることを確認し、空気中及び水中での信号の伝搬速度の違いが生じ、その結果を元に水位を推定できるかどうかを調べた。本実験で用いた水位計の構成を図 4.3 に示す。今回伝送路には、発泡ポリエチレンで絶縁した特性インピーダンス 300Ω の平行二線を、終端を開放させて用い、これを水位に応じて伝送路が水と接する長さを変更できるようにした。VNA には R&S 社の ZNB20 を用いた。この平行二線の入力端を VNA の入力ポートに繋ぎ、VNA が S パラメータを計測した後、その値を逆フーリエ変換することによって反射信号の強度を時系列で表示させた。

今回 VNA で得られた波形から、図 4.2 に示す 1 回目の立ち下がり時間 t_1 、2 回目の立ち上がり時間 t_2 を、得た。今回 t_1, t_2 は、立ち上がり信号の真ん中の部分とした。また、複数の水位における t_1, t_2 から v, v' を推定した。

t から v の推定について、水位 l_i における t_1, t_2 を t_{i1}, t_{i2} 、 l_j における t_1, t_2 を t_{j1}, t_{j2} としたとき、 t と v の関係は以下ようになる

表 4.1: VNA から読み取れる反射時間

水位	t_1 [ns]	t_2 [ns]	$t_2 - t_1$ [ns]
0 cm	4.6	4.8	0.22
10 cm	3.8	5.5	1.7
20 cm	3.0	6.2	3.2
30 cm	2.1	6.9	4.8
40 cm	1.2	7.6	6.4
50 cm	0.41	8.5	8.1

表 4.2: VNA から読み取れる伝送路の伝搬速度

水位	v [m/s]	v' [m/s]
0-10 cm	2.6×10^8	1.2×10^8
10-20 cm	2.5×10^8	1.3×10^8
20-30 cm	2.4×10^8	1.2×10^8
30-40 cm	2.4×10^8	1.3×10^8
40-50 cm	2.4×10^8	1.2×10^8

$$t_{j1} - t_{i1} = \frac{-2(l_j - l_i)}{v} \Leftrightarrow v = \frac{2(l_i - l_j)}{t_{j1} - t_{i1}} \quad (4.9)$$

また,

$$t_{i2} - t_{i1} = \Delta t_i \quad (4.10)$$

$$t_{j2} - t_{j1} = \Delta t_j \quad (4.11)$$

とすると, t と v の関係は以下ようになる.

$$\Delta t_j - \Delta t_i = \frac{2(l_j - l_i)}{v'} \Leftrightarrow v' = \frac{2(l_j - l_i)}{t_j - t_i} \quad (4.12)$$

従って, 異なる2点での反射時間を計測することで, v 及び v' の推定も可能となる.

今回 $L = 50\text{cm}$ とした上で l を 10cm 刻みで変え, t_1, t_2 を計測した.

また, 前後 10cm における t_1, t_2 から v, v' を推定した.

4.2.2 実験結果

図 4.4 に, 反射信号強度を時系列で表示させた際の概形を示す. このとき, 伝送路には立ち上がり信号が入力され, 実験の結果, 水位が増えるにつれて信号が立下がる瞬間から二回目に立ち上がる時間が増加し, 水位の値に比例していることが確認された. また, 一回目に信号が立ち上がる瞬間から二回目に立ち上がる瞬間までの時間が増加していることから, 水中に存在する伝送路の信号の伝送速度が空気中より遅くなることが確認された. 表 4.1 に, 伝送路に信号が入力されてから, 1 回目に波形の立ち下がりが観測されるまでの時間 t_1 , 信号が再び立ち上がるまでの時間 t_2 , 及びその差 $t_2 - t_1$ を示す. 水位が上昇する程空気中に存在する伝送路の距離が短くなるため, t_1 が小さくなる一方, 水中に存在する伝送路の距離が長くなるため, t_2 及び $t_2 - t_1$ が大きくなる. 表 4.2 に, 表 4.1 の値を元に計算した空気中の伝搬速度 (v), 水中の伝搬速度 (v') を示す. 伝送路が空気中に存在するときの伝搬速度は $2.4 \times 10^8 \sim 2.6 \times 10^8$ [m/s], 水中に存在するときの伝搬速度は $1.2 \times 10^8 \sim 1.3 \times 10^8$ [m/s] となった.

従って、信号を入力してから、界面で反射した信号が戻ってくるまでの時間を計測し、伝送路が空气中に存在する部分の長さを推定するか、あるいは水中の伝送路の終端部で反射した信号が戻ってくるまでの時間を計測し、水中での信号が空气中よりも伝搬速度が遅くなることによって反射時間が伸びることを利用して伝送路が水中に存在する部分の長さを推定することで、水位を推定することができることが明らかとなった。

4.3 平行二線によるマイコンを用いた水位推定手法

[33]で金属製プローブを用いてPICを使って水位を推定する手法が提案されたが、この手法では、伝送路の空气中の長さを計測することで、伝送路全体の長さから空气中の部分を引きこすことで水位を推定している。また、空气中に存在する伝送路の長さがある程度存在しない場合、PICのCTMUの計測精度の関係から空气中の伝送路の長さを推定することが困難となる。

このとき金属プローブの特性インピーダンスは $50\ \Omega$ であり、回路の基板側で同じ $50\ \Omega$ のマイクロストリップ線路を用意することで、金属プローブ部分が実際に空气中に触れている部分の長さが短くても、水位の変動を観測することが可能であった。

しかし平行二線を用いた場合、空气中に存在する平行二線の特性インピーダンスは $300\ \Omega$ であり、 $300\ \Omega$ のマイクロストリップ線路を基板側で用意するのは困難である。従って伝送路の空气中の部分の長さが短い場合、水位の推定が困難となる。

そこで4.2節における結果から、水中に平行線路が存在する際の、水中での伝搬速度が変化することで反射時間が変化することを利用して水位を推定する。つまり、図4.2における t_2 を計測することで、水位を推定することを試みる。

4.3.1 CTMUユニットによる反射時間計測

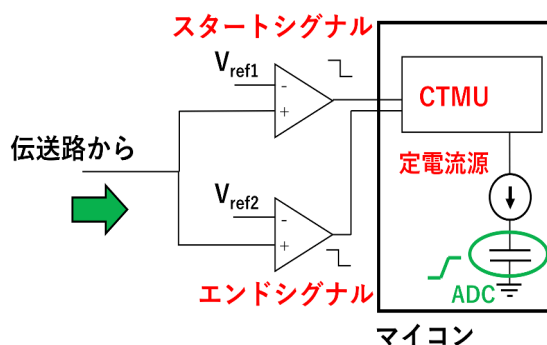


図 4.5: CTMU による反射時間計測. 伝送路上の信号が V_{ref1} を下回ったところでエッジが CTMU に入力され、定電流が ADC 内部のキャパシタに流れ始める. 伝送路上の信号が V_{ref2} を下回ったところで再びエッジが CTMU に入力され、定電流が流れ終わる. その後 ADC でキャパシタの電圧を計測することで、キャパシタに溜まった電荷から定電流が流れた時間を計測する.

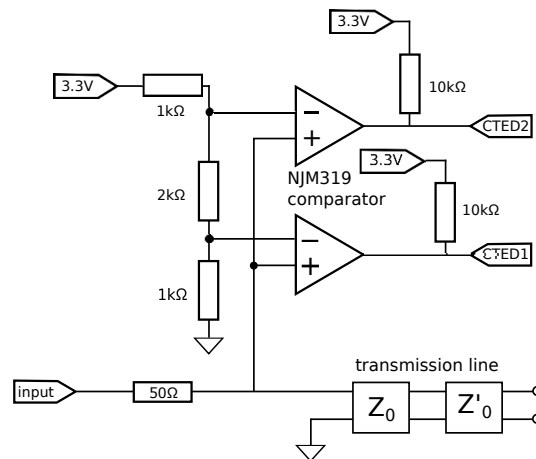


図 4.6: 反射波検出回路, V_{ref1} を 0.825 V に設定し, 定電流を流すために CTED1 に立ち下がり信号を送る. また, V_{ref2} を 2.425 V に設定し, 定電流を流し終えるために CTED2 に立ち下がり信号を送る.

ここで PIC に存在する CTMU を用いた時間計測回路を駆使して反射時間計測を行う方法を紹介する.

図 4.5 に Microchip 社製のマイクロコントローラである PIC の CTMU を用いた反射時間計測の概要を示す. 今回, 水位を計測するにあたり, 伝送路の空気に接する部分と水に接する部分の境界を特定するために, 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を観測するためには, ナノ秒のオーダーで時間を計測する必要があるため, 通常の汎用マイコンのタイマカウンタで直接時間を計測することは不可能である. そこで, CTMU によって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ことが可能となる. 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 の関係は以下ようになる.

$$t = \frac{CV}{I} \quad (4.13)$$

従って, 静電容量 C , 電流 I が既知の場合, 電圧 V を計測すれば, 電流の流れた時間 t を推定することができる.

また, 波形の反射時間を計測するためには, 信号を入力したタイミングで CTMU から電流を流し, 反射波が帰ってきたタイミングで電流を流し終える必要がある. このタイミングを計測する必要がある. このとき, 図 4.6 に表すコンパレータを用いた回路で, 伝送路の入力端の電圧を観測して, ある閾値を超えたタイミングで CTMU を駆動させることができる. PIC の CTMU には CTED1 と CTED2 と呼ばれる入力ピンが存在し, CTED1 に立ち下がりを入力することで CTMU の動作を開始させ, CTED2 に立ち下がりを入力することで CTMU の動作を終了させることができる.

図 4.7 にこの回路による反射時間の読み取り例を示す. このとき, 図 4.6 の input から立ち上がり信号が入力され, 伝送路上の電圧は一旦上がるが, このとき V_{ref1} よりも電圧が

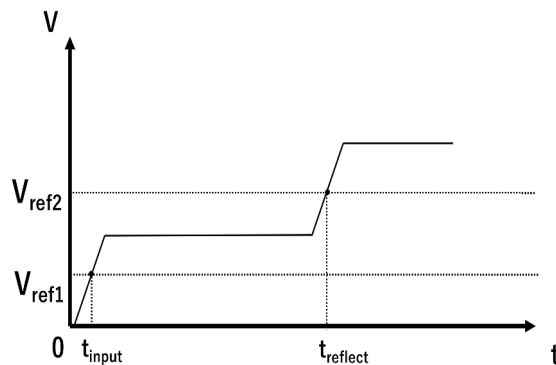


図 4.7: 回路による反射時間の読み取り例

上がるため、コンパレータが CTED1 にエッジを入力し、CTMU が起動してマイコン内部のキャパシタに定電流が入力される。次に終端の反射波が伝送路の入力端に戻ってきた際、伝送路上の電圧が再び上がり、このとき V_{ref2} よりも電圧が上がるため、コンパレータが CTED2 にエッジを入力し、キャパシタへの定電流の流入が終了する。このときキャパシタに溜まった電荷は、定電流が流れた時間に比例するため、伝送路が水中に浸かる長さが長いほど、伝搬する信号の反射時間が長くなるため、水位によって反射時間が変化する。従ってこの変化した時間を観測することで水位を推定することが可能となる。

4.3.2 実験環境

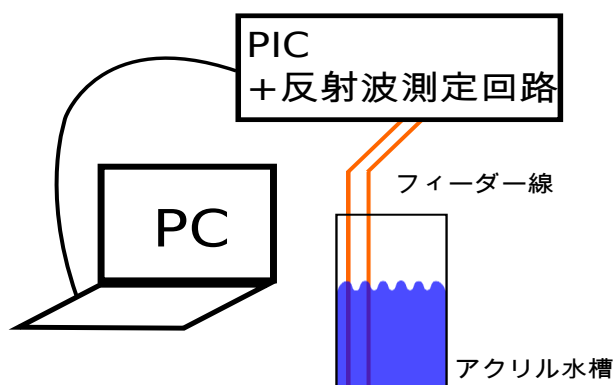


図 4.8: 実験構成を表した図。アクリル水槽の側面に特性インピーダンス 300Ω の平行二線を貼り付け、この平行二線にステップ信号を入力し、その反射波の反射時間を PIC と反射波計測回路を用いて読み取る。

今回この平行二線及び作成した回路による水位推定が行えるかどうか調べるために、水位と反射時間の線型性について調べた。

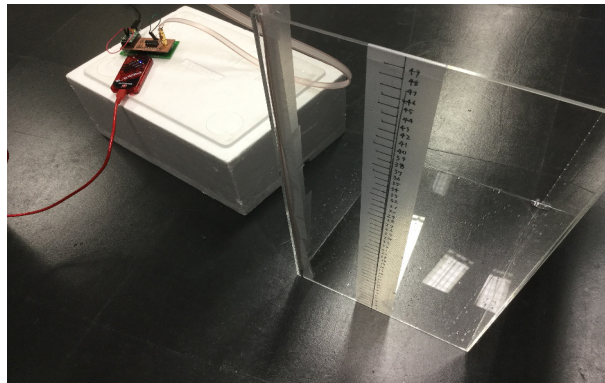


図 4.9: 実際に平行二線をアクリルの箱に取り付けて、水位を計測している図

今回伝送路には、発泡ポリエチレンで絶縁した特性インピーダンス 300Ω の平行二線を終端を開放させて用い、これを水位に応じて伝送路が水と接する長さを変更できるようにした。今回マイコンには PIC24FJ64GB002 を用いた。平行二線の入力端には、PIC の汎用入出力ピンに繋ぎ、 3.3 V のステップ入力を入力させた。また、この平行二線の入力端の電圧を、日本無線製の NJM319 コンパレータに入力し、閾値と比較した出力を、今回用いたマイコンである PIC の CTMU の入力ピンである CTED1 と CTED2 に繋いだ。

今回 CTMU から電流を流すキャパシタについては、PIC 内部の Analog-Digital コンバータ (ADC) に存在するキャパシタを利用した。CTMU から流す電流は、 $55 \mu\text{A}$ に設定した。

ステップ入力及び終端の反射波を検出する閾値としては議論の余地があるが、今回は初期検討として最初のステップ入力を検知するために、CTED1 に繋いだコンパレータの入力に、ステップ入力の $\frac{1}{4}$ 倍の電圧を入力した。また、終端からの反射波を検知するために、CTED2 に繋いだコンパレータの比較に、ステップ入力の $\frac{3}{4}$ 倍の電圧を入力した。

図 4.9 に、実際の実験の様子を示す。実験では、アクリル製の水槽に平行二線を貼り付けておき、水位を 0 cm から 49 cm まで 1 cm 刻みで変化させ、そのときのステップが立ち上がる時間から伝送路の終端の反射波が入力端に戻ってくるまでの反射時間を計測した。

今回、PIC 内部の ADC の値が反射時間を表すため、正確な時刻を求めるためには予め構成済みのキャパシタを用いて、式 (4.13) より与えられた C 及び I 、計測された V から t を求めることで、ADC の値と、実際の時間を変換することができるが、今回は水位計の線型性の確認を行うのみを目的としたので、ADC の値と実際の時刻の校正は行わなかった。そのため、以降 ADC の値を時間として表すことにする。

今回の ADC の値の導出にあたって、ADC の生の値を 1000 回取得し、その平均値をその水位における ADC の値とした。また、ADC は 10bit であるため、0 から 1023 までの 1024 段階で時間を表す。

4.3.3 水位と反射時間の値の比較

図 4.10 に実験によって得られた水位と反射時間を表す ADC の値の関係を表す。

今回単一の閾値を用いて伝送路の入力端の信号の立ち上がり、立ち下がりを検出して反射時間を計測したが、水位によって反射時間の上昇する割合が異なるような結果となった。

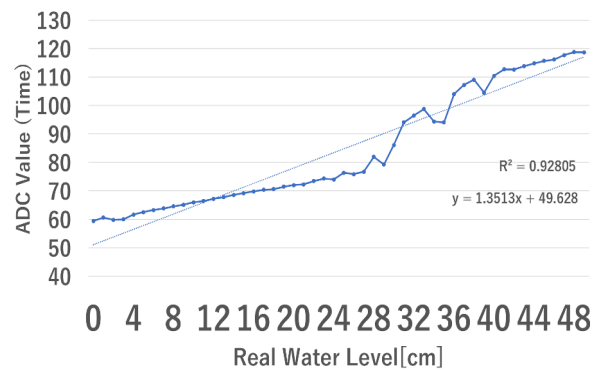


図 4.10: 水位上昇時の入力信号の反射時間と水位の関係. 青の実線は計測した値を表し. 点線は実線を直線に近似した近似曲線を表す.

例えば, 水位が 0 ~ 25 cm のときは, 水位が 1 cm 上昇すると共に, ADC の値が約 1 上昇していたが, 水位が 25 cm ~ 35 cm の場合では, 水位が 1 cm 上昇すると共に, ADC の値が約 1.8 上昇した.

また, 同じグラフ上に, この水位と反射時間を表す ADC の値を線型近似した近似曲線を描画したところ, 水位 1 cm の変化により ADC の値が約 1.3 上昇する直線となった.

4.1.1 節の手法を用いて水位を推定する場合, 水位と反射時間を表す ADC の値による校正曲線が必要となるが, 今回ここで得られた校正曲線を元にして水位を推定したところ, 平均で 4.1 cm, 最大で 7 cm 程, 真の水位の値から離れた値を推定した.

従って, 単一の閾値を用いた場合では, 水位の変化に応じて反射時間が線型に変化しないため, 4.1.1 節の手法を用いて反射時間から水位を推定した場合, 水位の計測範囲に対して誤差が 10 % 以上生じる結果となった.

4.4 複数の閾値を用いた TDR による水位推定手法

4.3 節で、単一の閾値を用いて伝送路上を伝搬する信号の反射時間を観測する際、水位によっては水位の変動と反射時間の関係の線型性が失われ、正確な水位を計測できないような状況が存在することが明らかとなった。この問題に対処するために、閾値を動かし、V-t グラフを作成することで伝送路上の信号波形を描画し、その波形を解析することで水位を推定することを試みた。

4.4.1 波形取得回路

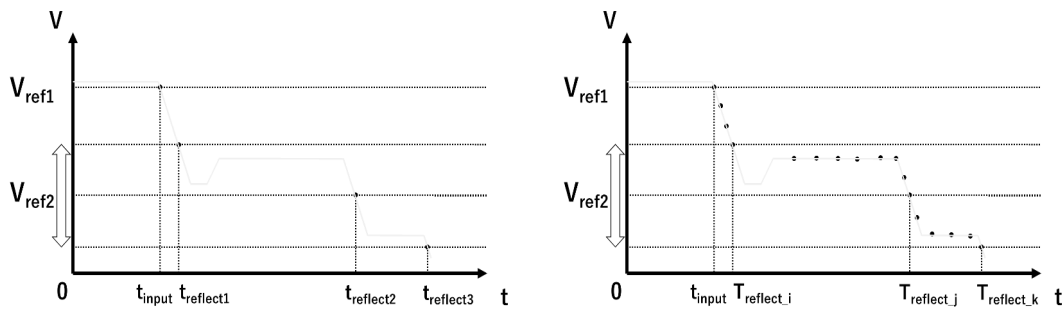


図 4.11: 回路による反射時間の読み取り例

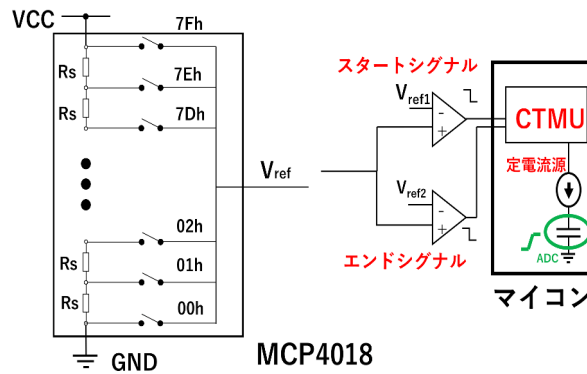


図 4.12: MCP4018 の概要. 右の回路の V_{ref1} および V_{ref2} に、別々の MCP4018 の V_{ref} を繋ぐ。

図 4.11 に波形を取得する例を示す。単一の閾値を設定する手法では、図 4.12 の V_{ref2} が単一であったため、信号の電圧波形を観測することはできなかったが、今回 V_{ref2} を可変にすることで、その電圧のときの反射時間が計測できるため、これを複数取することで、図 4.11 の右側のように、実際に伝送路の入力端で観測される波形に近い波形をサンプリングすることが可能となる。

図 4.12 に、今回閾値電圧を可変にするために利用した、電子ボリュームである MCP4018 の概形を示す。MCP4018 は内部に直列に繋がれた複数の抵抗を持っており、電氣的に抵

抗値を制御することができる可変抵抗である。この MCP4018 を図 4.12 のように電源電圧 (VCC) と GND に繋いで用いることで、128 段階に分圧された電圧を出力することができる。従って、図 4.12 において、信号が入力されることを検知するための閾値である V_{ref1} を電源電圧に設定し、 V_{ref2} を先述の MCP4018 によって分圧された電圧値にすることで、128 個の閾値における反射時間を計測することができる。このときの電圧と時間の対を電圧-時間グラフにプロットすることで、伝送路の時間領域における電圧波形を取得することが可能となり、通常の AD コンバータによる波形サンプリングよりも遙かに高速な信号波形を描画することができる。

4.4.2 波形からの反射時間取得

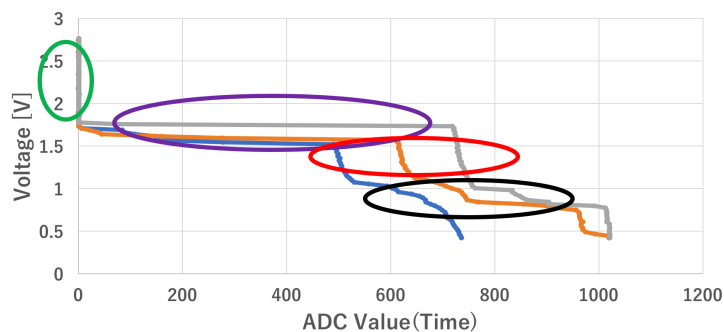


図 4.13: 今回作成した回路で取得された電圧波形の概形

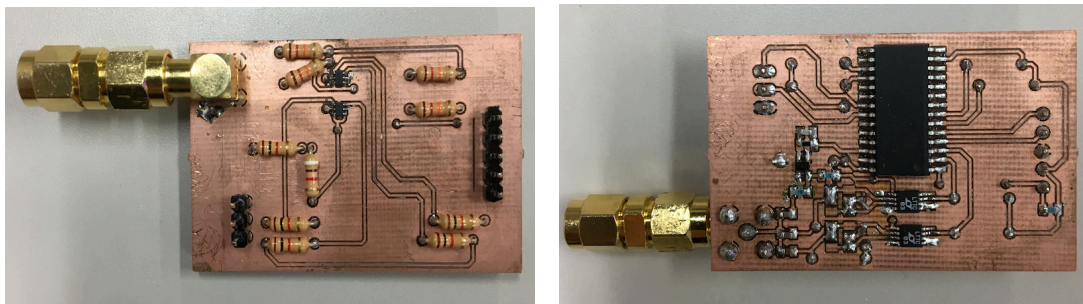


図 4.14: 今回作成した波形取得回路の実物

図 4.13 に今回図 4.14 に表す回路を平行二線に接続した際に得られた波形の一例を表す。この波形は、回路に繋がれた伝送路に立ち下がり信号を入力した際の伝送路の入力端の電圧波形を表すが、二回目の電圧降下が図 4.13 の赤い丸で囲まれた部分に相当する。

この波形は、MCP4018 で設定した電圧閾値と反射時間の対応をグラフ上にプロットしたものであり、実際には電圧の閾値と反射時間の対応となる情報の集まりである。そのため今回は閾値電圧の高い順番に反射時間を並べ、閾値電圧に対する反射時間の移動平均を

とり、反射時間が急激に変化する部分を検出することで、電圧波形の立ち下がりの部分を求めた。

図 4.13 で検出する流れを具体的に説明すると、まず緑色の丸で囲まれた電圧が 3 V から 1.8 V 付近の範囲では、反射時間を表す ADC の値がほぼ一定であるため、これが一つの立ち下がりであると認識できる。次に紫の丸で囲まれた、電圧が 1.8 V から 1.5 V 付近の範囲では、閾値電圧を少し動かしただけで反射時間が急激に変化するため、時間領域で見た場合、電圧が一定の値となっている領域であることがわかる。次に赤い丸で囲まれた、電圧が 1.8 V から 1.0 V 付近の範囲では、紫色で囲まれた部分と比較して、閾値電圧の変化に対する反射時間の変化がなだらかとなることからわかるため、この部分の反射時間の値を記録する。最後に黒丸で囲まれた、電圧が 1.0V 以下の範囲では、赤色の丸で囲まれた部分と比較して、閾値電圧の変化に対して反射時間が再び急激に上昇するため、赤色の丸で囲まれたような立ち下がりが終了したとわかる。

以上より、赤色で囲まれたような 2 回目の立ち下がり時間を記録できるため、今回はこの部分の反射時間の平均値を、2 回目の立ち下がり時間として扱った。

4.4.3 波形観測による水位推定実験と結果

今回作成した波形計測回路及び校正手法を用いて正しい水位の推定が行えることを示すため、アンテナ給電用の特性インピーダンス 300Ω の平行二線を用いて、この伝送路上の信号波形を計測した。平行二線の終端は開放し、入力端は回路側で 300Ω の抵抗を用いて整合させた。

空気中に存在する伝送路の長さ計測

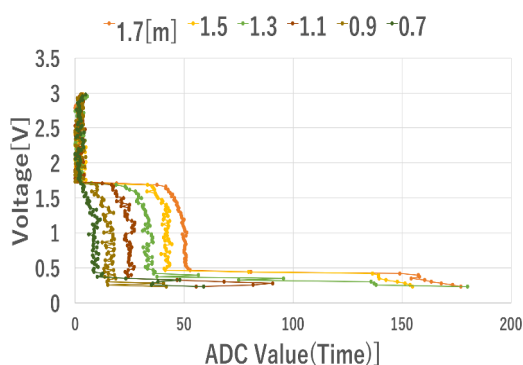
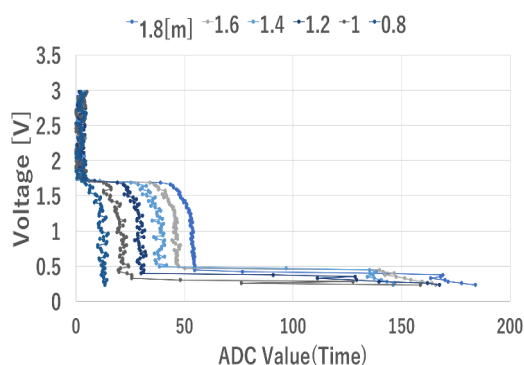


図 4.15: 伝送路の長さ計測結果 (0.8m-1.8m) 図 4.16: 伝送路の長さ計測結果 (0.7m-1.7m)

今回はまず伝送路の長さが増えることによる反射時間の変化をこの回路で観測できるかどうか調べるために、伝送路を空気中に置き、その際の時間-電圧グラフを描画し、反射時間を調べた。

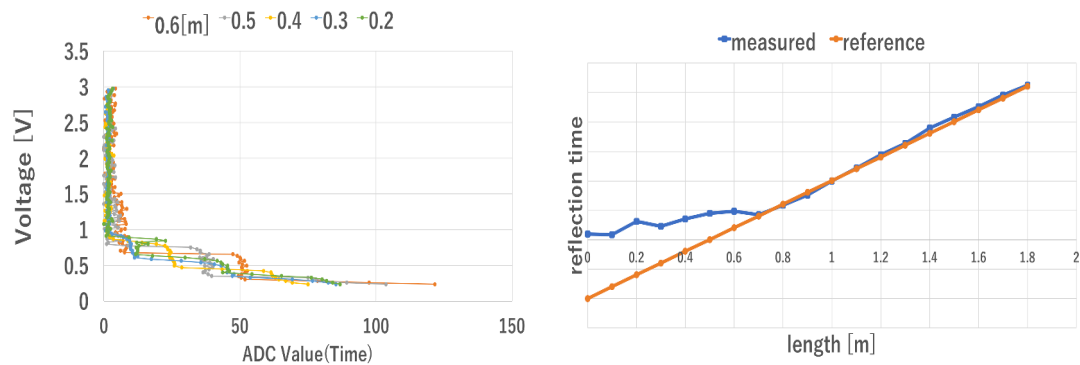


図 4.17: 伝送路の長さ計測結果 (0.6m 以下) 図 4.18: 閾値が 0.6-1.5 V での線型性比較

今回平行二線を 0.20 m から 1.8 m まで 0.10 m 刻みで変化させ、その際の変化の様子を調べた。一つの閾値ごとに 5 回反射時間を計測し、その平均値をその閾値における反射時間としてグラフ状にプロットした。

このときの結果を図 4.15 から 4.17 に示す。グラフの縦軸は閾値の電圧で、横軸は時間を表すマイコンの ADC の値である。実験の結果、0.60 m 以下と 0.70 m 以上で、反射時間が伸び始める閾値電圧が異なった。伝送路の長さが 0.70 m 以上では、1.8 V から 0.6 V の部分で、伝送路の終端部分で反射した信号が入力端で戻ってきたものと思われる立ち下がりが観測された。また、伝送路の長さが伸びるにつれて反射時間が長くなる様子が 1.8 V から 0.6 V で観測された。一方で伝送路の長さが 0.60 m 以下では 1.8 V から 0.6 V の部分で、反射時間が伸びる様子を観測することができず、0.6 V 以下で何かしら信号が反射している様子が観測された。図 4.18 に、閾値が 1.8V から 0.6 V の時の反射時間の平均値を、伝送路の長さごとにグラフにしたものを示す。青色のグラフが実際の反射時間の観測値で、オレンジ色のグラフは、青色のグラフの線型性と比較するために、伝送路の長さが 0.7 m と 1.8 m の時のグラフ上の点を通る直線を描いたものである。このグラフより、伝送路の長さが 0.7 m から 1.8 m の時は、伝送路が長くなる割合に対して、反射時間が一定の割合で伸びていることが確認できるが、伝送路の長さが 0.6 m 以下の時は、反射時間が伝送路の伸びに対して一定の割合で伸びていないことが確認できる。

このような症状が起きる原因として、伝送路が短い場合 CTMU から流れてくる電流量が小さすぎて、キャパシタの電圧を計る際に正常に計測できなかったことが考えられる。従って、今回の回路では、伝送路が 0.60 m 以上存在する際に、水位が計測できることが明らかとなった。

伝送路の水中に存在する部分の長さ推定



図 4.19: 計測に使用した平行二線

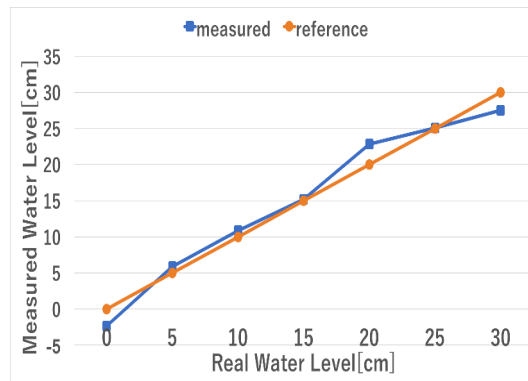


図 4.20: 水位が0~30cmの際の水位推定結果

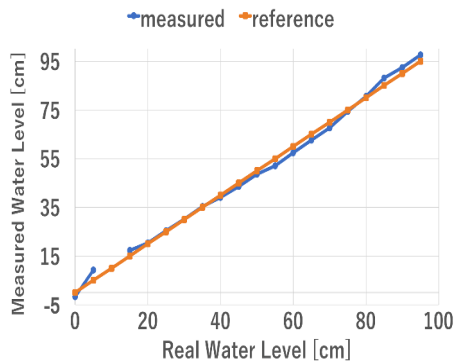


図 4.21: 水位が0~1mの際の水位推定結果

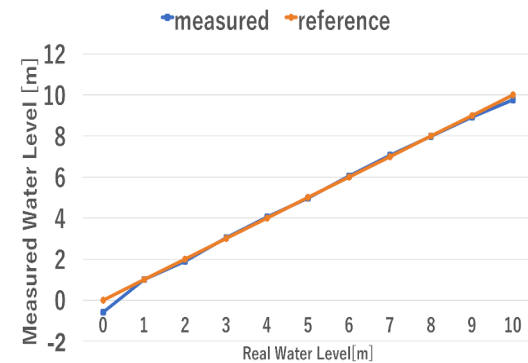


図 4.22: 水位が0~10mの際の水位推定結果

次に平行二線を水中に沈め、水位を変化させることで電圧波形グラフが変化し、水位を推定することが可能かどうかを調べるために、実際に平行二線を水中に沈めてグラフを描画させた。

計測する水位の範囲は、それぞれ0~10 m, 0~1.0 m, 0~30 cmの3つであり、それぞれの長さに合わせた伝送路を用意した。今回計測するにあたって、10 mの水位を計測するために、東京大学の三四郎池に10 m分の平行二線を設置し、平行二線を池に平行に沈め、水中に存在する伝送路の長さを計測した。そのため、図4.23のように、伝送路を上から垂らして計測する様子を擬似的に再現している。

一方今回30 cmおよび1.0 mでは、図4.19に示すように平行二線を塩ビパイプに沿って取り付け、図4.24のように平行線路を往復させて計測した。これは、伝送線路の長さがある程度稼ぐために往復させたのと、伝送線路の長さを伸ばすことでダイナミックレンジを上げることが目的である。1.0 mの水位を計測するために、伝送路を2.0 m用意し、それを図4.19のように取り付けたものを、1.0 mの深さがある塩ビ管に沈め、水位を変化させるごとに波形を観測した。また、30 cmの水位を計測するために、伝送路を60 cm用意し、同じく図4.19のように取り付けたものを、深さ30 cmのアクリル水槽に入れ、水位

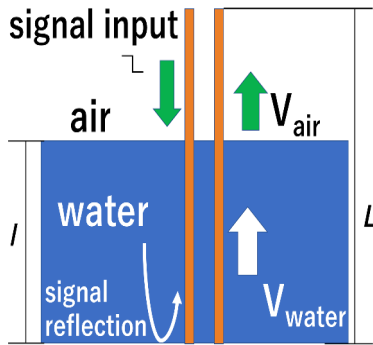


図 4.23: 平行二線への信号入力

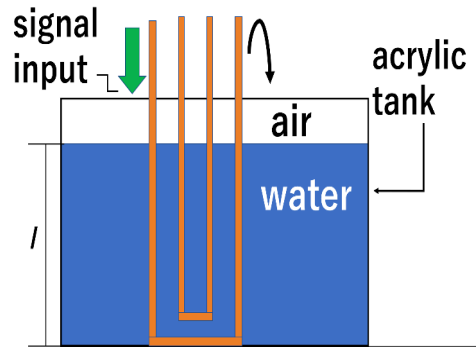


図 4.24: 平行二線への信号入力 (往復)

を変化させるごとに波形を観測した。そして得られた波形から、4.4.2 節の手法を用いて、伝送路終端で反射した信号が戻ってくる時間を表す 2 回目の立ち下がりの時間を推定し、それをその水位における反射時間とした。また、一つの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。

そして今回得た水位と反射時間の関係から、4.1.1 節で説明した手法で近似曲線を作成し、その近似曲線と実際に計測で得られた値を比較して、その誤差を調べた。また、今回校正曲線との誤差があまりにも大きかった場合は、水位計として使える範囲外として扱う。今回は、全体の計測レンジに対して誤差が 5 % 以内に収まる範囲を水位計の有効範囲とした。例えば伝送路の長さが 10 m の場合、50 cm 以上校正曲線から離れるような水位では、その水位計の計測対象外として扱った。

表 4.3 に今回計測した水位における水位の推定値を示す。0~10 m の計測範囲では、水位が 0 m や 10 m の時は、水位計として使える有効範囲は 1.0~10 m となり、この範囲内での平均的な誤差は 9.1 cm となった。水位が 0 m の時は、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。また、水位が 10 m の時に大きく誤差が生じ、校正曲線と比較した場合、約 24 cm の誤差が生じた。一方 0~1 m の計測範囲では有効範囲が有効範囲は 0~95 cm となり、平均的な誤差は 2.1 cm となった。また、0~30 cm の計測範囲では、有効範囲が 5~15 cm となり、低水位の際は静電容量などの手法と比較して精度が劣った結果となった。今回、全ての計測範囲において、水位が 0 付近の低水位の際や、伝送路の長さギリギリまで水位が存在する際に誤差が大きくなった。これは水位が伝送路の始端や終端に近くにつれ、式 4.6 の $L-l$ や l の誤差が大きくなることに由来すると考えられる。

表 4.3: 水位計測の精度

水位計測範囲	センサ有効範囲	平均誤差	最大誤差
0~10 m	1.0~9.0 m	9.1 cm	24 cm
0~1.0 m	0~1.0 m	2.1 cm	4.5 cm
0~30 cm	5~15 cm	0.71 cm	0.89 cm

4.5 まとめ

本章では、平行二線を用いた水位推定を可能にするために、空気中と水中の信号の伝搬速度の違いを用いて伝送路上の反射時間を計測した。反射時間をマイコンで計測する際に、コンパレータを用いた回路で閾値電圧を設定し、伝送路上の信号電圧が閾値を超えたら、CTMU モジュールを駆動して、マイコン内部のキャパシタに溜まった電圧を計測することで反射時間を計測した。このとき、一つの閾値のみで反射時間を計測した場合は、水位と共に反射時間の関係が線型にならないことがあることがわかったが、電子ボリュームを用いて、複数の閾値を用いて閾値電圧と反射時間の対応をグラフ上に描画することで、水位と共に線型に変化する反射時間を観測することができた。また、30 cm, 1 m, 10 m の3つの範囲でそれぞれ水位を変化させて反射時間を計測したところ、いずれも水位と共に反射時間が線型で変化する領域が存在したため、この原理を用いて反射時間から水位を推定できることを明らかにした。

■ 第5章

結論

5.1 本研究の主たる貢献

本研究では、誘電率計測を用いた二つの水位計を開発し、静電容量計測を用いた水位計に関しては、薄膜電極の静電容量計測の際に複数の電極をマイコンで計測する必要があったが、それを汎用マイコンとマルチプレクサを用いた回路で複数の静電容量を計測し、その値を元に水位を推定したところ、平常時で水位が40 cm程度までで、4 cm程度の精度で水位を推定できた。また、実際の圃場で運用したところ、精度は1 cmには満たなかったものの、圃場での水田水位の様子を確認でき、稲作における指標に用いることができることが確認できた。また、既存の土壤水分系と共通の計測回路を用いて水位を推定することができ、プローブを脱着可能にすることで、様々な長さのプローブを計測回路に刺せるような水位計を実現した。これによって、水位推定と土壤水分推定のうち、圃場で行いたいものに合わせてプローブを選択でき、また同じデータアップロード環境やクラウド環境を使うことができるため、総合的に見たセンサの運用コストを下げることができた。このため、静電容量方式の水位計を用いることで、水田水位を計測するために必要な数十センチの範囲の水位を精度数センチ程度で推定可能であることを示した。

一方TDRを用いた水位計に関しては、平行二線を用いた水位計を作成し、計測範囲を設置時に自由に調節することができるものを作成した。また、汎用マイコン及び電子ボリュームやコンパレータなどの素子を用いて、従来汎用マイコンでサンプリングできなかったような高速な波形の変動を低コストで計測することを可能にし、30 cmから10 mまでの範囲の水位を、精度が10 cm程度で推定できることを示した。このため、TDRを用いた水位計を用いることで、河川や湖沼の継続的なモニタリングに必要な、数 mまでの範囲の水位を、精度が数センチ程度で推定可能であることを示した。

これら二つの水位計は共に計測範囲の限界はあるものの、二つを有効に組み合わせることで、様々な範囲の水位を、誘電率計測を用いた水位計で推定できることを示した。

5.2 今後の課題

水位計を開発するなかで、今後の課題についても確認できた。まず、静電容量計測を用いた水位計に関しては、今回設置した水田水位は、最大でも10 cm程度のものであり、今回用意した40 cmのプローブでは長すぎる結果となった。そのため、計測する範囲によっては、より短いものを用意の方が精度が向上する可能性があるため、用途に応じてプローブの長さを調節できるようなものを作成することが上げられる。また、水位が15 cm以下の際に、配線の静電容量を計測する際にADCの値が飽和してしまったために、校正用の電極の静電容量を低めに見積もり、その結果水位を高めに見積もってしまったため、配線用の電極形状の工夫や、配線容量を除去する条件を工夫することで、より正確な水位推定を導出する方法を考える必要がある。また、大雨などが降った際に、通常の水位的変動とは異なるような値が観測された。これはプローブ部分に大量の雨水が付着し、水位がずれたものと推測されるため、プローブにカバーなどを取り付けられるような設計を考える必要がある。さらに、強い風や台風などが現れたときに、現状のプローブが揺れ、水位推定に影響が出る可能性があるため、運用も考えた作りをする必要がある。

TDRを用いた水位計に関しては、純粋な水の水位を推定することはできたものの、地下水などの純粋な水以外にも、湿った土が存在するような状況や、氷の厚さを計測したい

ような状況でこの水位計を用いることができるかは確認できていないため、この TDR 水位計を様々な環境下で運用し、その性能や限界を調査することが挙げられる。

参考文献

- [1] 農研機構. (研究成果) 田んぼの水管理を ict で遠隔操作・自動制御. http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nire/076704.html. Accessed January 22, 2018.
- [2] グリーンジャパン. クリンチャー 1 キロ粒剤. http://www.greenjapan.co.jp/krincha_1k_r.htm. Accessed January 31, 2018.
- [3] 環境省. Stop the 温暖化 2017. <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/knowledge/Stop2017.pdf>. Accessed January 22, 2018.
- [4] 仁齋藤, 大地中山, 岳樹泉, 洋松山. 土砂災害を引き起こす降雨のリアルタイムモニタリング: 2種類の降雨イベントに着目した swing system の構築と検証. GIS: 理論と応用 = Theory and applications of GIS, Vol. 19, No. 2, pp. 81–90, 2011.
- [5] OKI. ネットワーク型「ゼロエネルギー超音波水位計」を販売開始. <https://www.oki.com/jp/press/2017/10/z17038.html>. Accessed January 31, 2018.
- [6] 農林水産技術会議. 日本型精密農業を目指した技術開発. 農林水産研究開発レポート No.24, 農林水産省, 2008.
- [7] Mihai T Lazarescu. Design of a wsn platform for long-term environmental monitoring for iot applications. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 45–54, 2013.
- [8] G Clarke Topp, JL Davis, and Aa P Annan. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water resources research*, Vol. 16, No. 3, pp. 574–582, 1980.
- [9] Sentek. environscan probe. <http://www.sentek.com.au/products/enviro-scan-probe.asp>. Accessed January 26, 2018.
- [10] TJ Kelleners, DA Robinson, PJ Shouse, JE Ayars, and TH Skaggs. Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 69, No. 1, pp. 67–76, 2005.
- [11] PA Ferré and GC Topp. Time-domain reflectometry techniques for soil water content and electrical conductivity measurements. *Sensors update*, Vol. 7, No. 1, pp. 277–300, 2000.

- [12] Wojciech Skierucha and Andrzej Wilczek. A fdr sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10–500 mhz frequency range. *Sensors*, Vol. 10, No. 4, pp. 3314–3329, 2010.
- [13] Decagon. Ech20-20. <http://www.decagon.eu/products/discontinued-products/ech20-2/>. Accessed January 26, 2018.
- [14] Yuki Kojima, Ryo Shigeta, Naoya Miyamoto, Yasutomo Shirahama, Kazuhiro Nishioka, Masaru Mizoguchi, and Yoshihiro Kawahara. Low-cost soil moisture profile probe using thin-film capacitors and a capacitive touch sensor. *Sensors*, Vol. 16, No. 8, p. 1292, 2016.
- [15] Yoshihiro Kawahara, Hoseon Lee, and Manos M Tentzeris. Sensprout: Inkjet-printed soil moisture and leaf wetness sensor. In *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*, pp. 545–545. ACM, 2012.
- [16] Amin Rida, Li Yang, Rushi Vyas, and Manos M Tentzeris. Conductive inkjet-printed antennas on flexible low-cost paper-based substrates for rfid and wsn applications. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 51, No. 3, pp. 13–23, 2009.
- [17] Aman Kansal, Jason Hsu, Sadaf Zahedi, and Mani B Srivastava. Power management in energy harvesting sensor networks. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, Vol. 6, No. 4, p. 32, 2007.
- [18] David L Mascarenas, Eric B Flynn, Michael D Todd, Timothy G Overly, Kevin M Farinholt, Gyuhae Park, and Charles R Farrar. Experimental studies of using wireless energy transmission for powering embedded sensor nodes. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 12, pp. 2421–2433, 2010.
- [19] Gamicos. Glt500a. https://gavin.en.alibaba.com/product/60130528834-800269403/30m_100m_Deep_Well_Electronic_Water_Level_Dipmeter.html. Accessed January 13, 2018.
- [20] 農業総合研究所作物研究センター栽培科. 圃場地下水位の簡易測定法. 平成 24 年度新潟県農林水産業研究成果集, 新潟県農業総合研究所, 2012.
- [21] 金哲鎬, 藤井衛, 小川正宏. 戸建住宅を対象とした地下水位測定法と土質判別に関する研究. 日本建築学会技術報告集, Vol. 19, No. No.41, pp. 89–94, 2013.
- [22] 株式会社ノーケン. 超音波式レベル計・multiranger 100/200. http://www.nohken.com/japan/product/level_sensor/noncontact/mr100200.html. Accessed January 13, 2018.
- [23] Matthew Minasi. Using ultrasonic sensing to monitor level in tanks. <http://www.ti.com/lit/an/snua270/snua270.pdf>. Accessed on January 14, 2018.

- [24] 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.
- [25] Jenny Terzic, Edin Terzic, Romesh Nagarajah, and Muhammad Alamgir. Ultrasonic sensing technology. In *Ultrasonic Fluid Quantity Measurement in Dynamic Vehicular Applications*, pp. 11–35. Springer, 2013.
- [26] vegetalia. Paddywatch. <https://field-server.jp/paddywatch/>. Accessed January 8, 2018.
- [27] JFE アドバンテック. 投込圧力式水位計 sl シリーズ. <https://www.jfe-advantech.co.jp/water/pdf/JC-SLS-16A.pdf>. Accessed January 8, 2018.
- [28] 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.
- [29] 繁田亮, 興梶智紀, 川原圭博, 浅見徹. 薄膜土壌水分プロファイルプローブにおける線間容量除去手法. 信学総大, Vol. B-18-14, No. 1, p. 512, 2016.
- [30] Ta Duc Tung, Mizoguchi Masaru, Kawahara Yoshihiro, and Asami Tohru. Error reduction in capacitive based water level sensor for paddy field. 信学総大, Vol. B-18-16, No. 1, p. 524, 2016.
- [31] キーエンス. レベルセンサ ハンドブック. <https://www.keyence.co.jp/>. Accessed January 14, 2018.
- [32] D Moret, JL Arrue, MV Lopez, and R Gracia. A new tdr waveform analysis approach for soil moisture profiling using a single probe. *Journal of hydrology*, Vol. 321, No. 1, pp. 163–172, 2006.
- [33] J. BARTLING. Time domain reflectometry (tdr) for low-cost liquid level measurement. <http://www.edn.com/design/sensors>. Accessed January 25, 2018.
- [34] Anton Thomsen, B Hansen, and Kirsten Schelde. Application of tdr to water level measurement. *Journal of Hydrology*, Vol. 236, No. 3, pp. 252–258, 2000.
- [35] Konstantinos Loizou, Eftichios Koutroulis, Dimitrios Zalikas, and Georgios Liontas. A low-cost sensor based on time-domain reflectometry for water level monitoring in environmental applications. In *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on*, pp. 261–266. IEEE, 2015.
- [36] J.L.Arre D.Moret, M.V.Lpez. Tdr application for automated water level measurement from mariotte reservoirs in tension disc infiltrometers. *Journal of Hydrology*, Vol. 297, pp. 229–235, 2004.

-
- [37] Chung Chung Chih, Ping Lin Chih, Ling Wu I, Hung Chen Ping, and Kuei Tsay Ting. New tdr waveguides and data reduction method for monitoring of stream and drainage stage. *Journal of Hydrology*, Vol. 505, pp. 346–351, 2013.
- [38] Andrea Cataldo, Egidio De Benedetto, Giuseppe Cannazza, Giuseppina Monti, and Emanuele Piuzzi. Tdr-based monitoring of rising damp through the embedding of wire-like sensing elements in building structures. *Measurement*, Vol. 98, pp. 355–360, 2017.
- [39] 関和雄森屋俣昌. 高周波計測: マイクロ波通信からデバイスまで. 東京電機大学出版局, 1998.
- [40] Dennis Trebbels, Alois Kern, Felix Fellhauer, Christof Huebner, and Roland Zengerle. Miniaturized fpga-based high-resolution time-domain reflectometer. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 62, pp. 2101–2113, 2013.

発表文献

国内研究会

- [1] 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,” 信学技報, vol.116, no.308, pp.97-102, Nov. 2016.

ポスター発表

- [2] 鈴木康大, 繁田亮, 川原圭博, “農業向け多用途計測回路の実装とセルフキャリブレーション可能な薄膜実装水田水位計への応用,” 信学技報, 鶴岡市, 山形県, Nov. 2017.

全国大会

- [3] 鈴木康大, 繁田亮, 川原圭博, “計測深度調節が容易な平行二線伝送路を用いた水位計測のための時間領域反射計測手法,” 信学技報, 足立区, 東京都, Mar. 2018(発表予定).

修士論文の内容以外の発表文献

論文誌

- [4] R. Shigeta, K. Suzuki, F. Okuya, and Y. Kawahara, “Trilateration-Inspired Sensor Node Position Estimation for UAV-Assisted Microwave Wireless Power Transfer,” SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 10, No. 5, pp.350-359, Sept. 2017.

国際研究会

- [5] K. Suzuki, R. Shigeta, Y. Kawahara, and T. Asami, “Bilateration-based Position Estimation of Sensor Nodes for UAV-assisted Wireless Power Transfer Systems,” Proc. First International Workshop on Smart Sensing Systems (IWSSS 2016), pp.66-71, Hiroshima, Japan, Nov. 2016.

謝辞

本研究及び修士論文の執筆にあたり，毎週ミーティングで様々なアドバイスを与えて下さり，厳しいながらも適切な指導をしてくださった川原准教授や博士課程の繁田さんに深く感謝します。また，退官されるまで川原先生と共に指導していただき，時には自分の発表した内容について詳しい議論をさせて頂いた浅見名誉教授にも深く感謝します。また，自分の研究で実際に実装した水位計について，SenSprout で実際に作っている土壤水分計を元にした実装についてのアドバイスや，圃場での運用についてアドバイスを下さったSenSprout の宮元さんや桜庭さんにも深く感謝します。また，東大田無の圃場で実験をさせてくださった東京大学農学部の佐々木助教や，茨城県の圃場で実験をさせてくださった有限会社ユニオンファームの玉造さんにも深く感謝します。また，論文執筆の際に，自分の良くない文章を適切な文章に直し，アドバイスを下さった博士課程の鳴海さんを筆頭とした研究室の方々に深く感謝します。また，この二年間修士課程を終えるまで切磋琢磨し，互いに成長しあった同期である，笹谷，飯塚，池内に深く感謝します。また，研究室内で円滑な手続きをサポートして下さった金井さん，藤田さん，水野さんにも深く感謝します。

最後に，大学院での生活を支えてくださった家族に心より感謝します。