

技術紹介

5

静電容量型水位計の開発

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

Keywords : Capacitive sensing, IoT, Water level sensor

要 旨

世界的に起きている気候変動が日本国内にも見られ、災害が増加傾向にあります。とりわけ山間部に位置する地方都市においては土砂災害や小規模河川の氾濫などが危惧されます。しかしながら小規模な水域の管轄体が多岐にわたることから、国が管理する大規模河川に比べて災害に対する予防策が進んでいないのが現状です。それに加え水位計測システムのコスト高が小規模水域における治水システム導入の主な障壁になっております。そこで機械的機構がなく、堅牢性に富み低コストなどのメリットが挙げられる静電容量型の水位センサの活用が見込まれます。弊社が MEMS 加速度計で培ってきた高精度な静電容量検出技術を水位センサの開発へ応用し、治水システムの普及に貢献してまいります。本稿では、その検出回路及び試作した水位センサについてご紹介します。

SUMMARY

Disasters are on the rise in the world and Japan. In particular, rural cities in mountainous areas have also faced landslides or flooding of small rivers crisis. Although flood control systems of large rivers managed by the national governments have been in place for decades, disaster prevention measures in small water bodies aren't on the way due to segmentalized water jurisdictions. In addition, the cost of water level sensors has hindered the introduction of the system, so low-cost robust capacitive water level sensors are in demand.

We have developed high-precision capacitance detection technology for MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) accelerometers. Now, we are trying to exploit the technology to the capacitive water level sensor. This paper shows the mechanism of a capacitive detection circuit and a prototype water level sensor.

1. はじめに

コロナウイルス感染症により、社会情勢から個人の意識にいたるまで様々な面において変革が加速しています。1-3)パンデミックが人類共通の危機について振り返るきっかけになると同時に、格差拡大や感染など目下の危機が価値観へ影響を与え、100年に一度と言われるような異常気象による災害が頻発していることもあいまって、持続可能な社会への認識が広がりました。4,5)それらの意識が経済的合理性以外の価値をもたらし、消費行動及び投資に新たな循環を生み出す中で、社会課題に取り組む意義が高まっています。その変革の中で少子高齢化や人口流出が叫ばれている地方都市が、課題と実験の土壌を研究機関や企業に提供することで開発を行い、持続可能な地域社会を模索する取り組みが活発化しています。2)

その課題の一つとして気候変動リスクへの対処があげられます。日本国内での水害は年々増加傾向にあり、6)山間部に位置する地方都市では小規模水域の氾濫や土砂災害のリスクに曝され続けています。しかしながらこれらの水域は個人・自治体・市町村など多岐にわたる管理主体に加えて、小規模・多数・広範囲という特性を有することから治水システムの導入が進んでいない現状にあります。そこで私たちは治水システムに必要なセンサとIoT (Internet of Things) デバイス等を開発し、7)産官公連携を通してこれらの課題解決を目指して活動しています。

大規模河川で従来使用されてきた水位計はコストが高いという課題があります。そのため、堅牢性に富みかつ低コストであるメリットを有する静電容量型水位計の活用が期待されています。8,9)静電容量型水位計では水が電極間に入り込み、その際の電極間の静電容量の変化を水位として検出します。深い水深まで測るためには、回路の容量検出レンジが広くなければなりません。一般的には検出レンジと検出精度はトレードオフの関係になっています。また精度を高める際には、水位に対する静電容量の変化を大きくするために電極寸法が大きくなり、ノミナル容量も増加してしまいます。そこで、当社が加速度計の開発で培ってきた静電容量検出技術を応用した水位計を開発しました。本検出回路では容量差を増幅することで大きなノミナル容量をキャンセルし、高精度な容量検出が可能となります。また測定レンジについてもデジタル制御により調整が容易な仕組みとなっております。本稿ではその検出回路及び試作した水位センサについてご紹介します。

2. 検出原理と回路構成

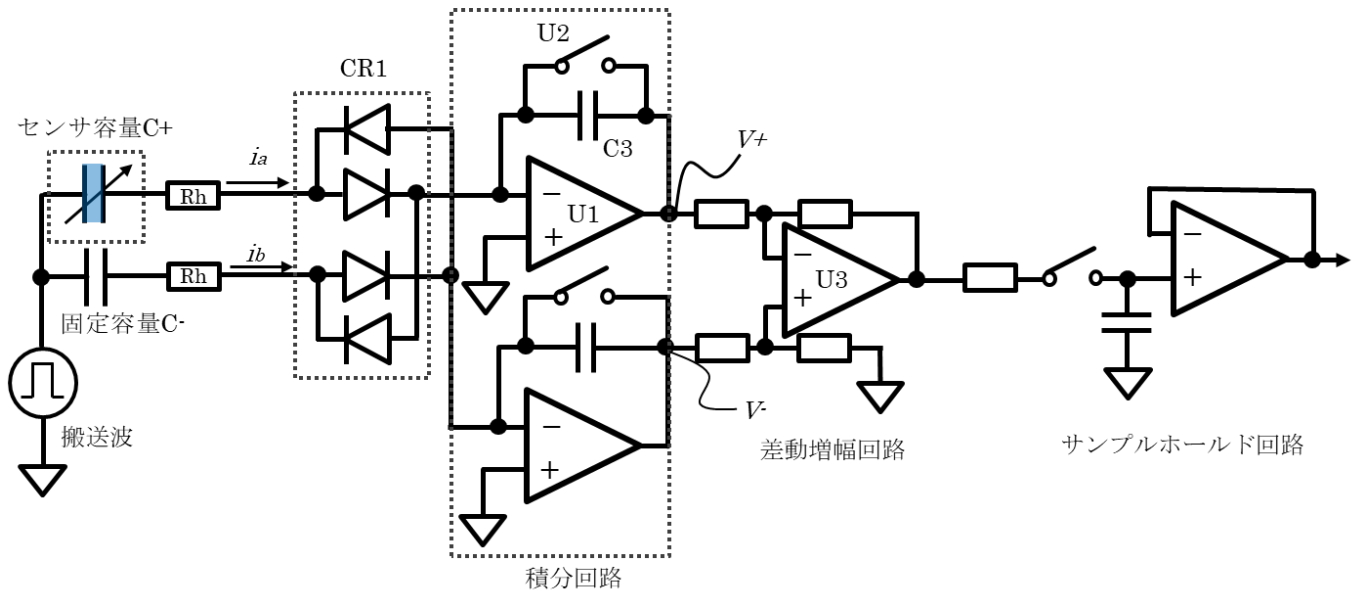


図 1. 水位計に用いる静電容量検出回路

静電容量型水位計に使われている静電容量検出回路を図 1 に示します。C₊は水が電極間に入り込むことにより容量が変化するセンサ容量となります。その容量の変化量を固定容量 C₋と比較した値が、水位に対応するセンサ出力となります。回路動作時には、搬送波である交流電圧をそれらの容量に印加します。その際に、容量を流れる電流は時定数に依存します。ここで、図 1 における直列寄生抵抗成分を R_h、搬送波を印加した際にセンサ容量に流れる電流を i_a、搬送波の振幅を V_{pp}、整流回路 CR₁ による電圧降下を V_F とします。ここで初期充電電荷はない状態で、切り替わった時の時刻を初期値とすると、

$$i_a = \frac{V_{pp} - 2V_F}{R_h} e^{-\frac{t}{R_h C_+}} \quad \text{式 1}$$

と表せます。式 1 から分かるように、容量が大きいほど搬送波の微分信号の時定数が大きいため、流れる電流が増加します。i_a と i_b は整流回路 CR₁ を通り、オペアンプ U₁ の積分回路により電流値が電圧値へ変換されます。ここで積分容量を C₃ とすると、搬送波 1 周期分を積分した際の積分回路出力 V₊は

$$\begin{aligned}
 V_+ &= -\frac{1}{C_3} \int_0^{\infty} i dt \\
 &= -\frac{V_{pp} - 2V_F}{R_h C_3} \int_0^{\infty} e^{-\frac{t}{R_h C_+}} dt \\
 &= \frac{(2V_F - V_{pp})C_+}{C_3}
 \end{aligned}
 \tag{式 2}$$

となります。また整流回路 CR1 により、 i_b は i_a と逆向きに整流されて積分されるので、正負逆の信号が現れます。よって同様に搬送波 1 周期分を積分した際の出力 V_- は以下ようになります。

$$V_- = -\frac{(2V_F - V_{pp})C_-}{C_3}
 \tag{式 3}$$

ここで改めて回路動作のタイミングチャートを図 2 に示します。上記に述べたように回路動作時には搬送波がセンサ容量と固定容量に印加されます。その際には静電容量が大きいほうが微分信号の時定数が大きく、相応する積分信号の電圧も大きくなります。また 2 つの積分信号はダイオードの向きを逆にしているので、正負逆の信号が現れるようになっており、この 2 つの信号を差動増幅したものをサンプルホールドします。

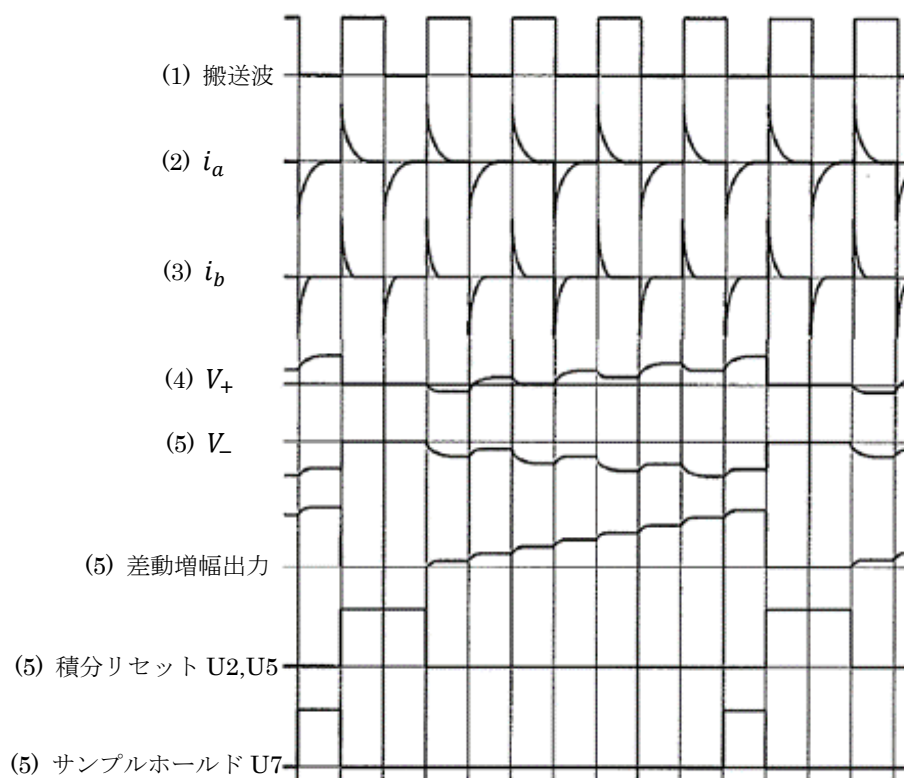


図 2. 検出回路のタイミングチャート

積分回路のリセットはスイッチ U2,U5 で行われます。図 2 に示すようにリセット周期間隔において、積分値が増えて行っていることがわかります。ここで積分回数 x 回後の差動回路出力 ΔV は、水位による容量変化を $C_+ - C_- = \Delta C$ [pF/mm] とすると、

$$\Delta V = x \times (V_- - V_+) = \frac{x(V_{pp} - 2V_F)\Delta C}{C_3} \quad \text{式 4}$$

となります。差動回路出力 ΔV が水位による容量変化 ΔC に比例しており、本検出回路によって水位を計測できることがわかります。本検出回路の出力電圧値は積分回数にも比例しているので、MCU (Micro Controller Unit) によりカウントアップの周期を調整することで、出力飽和時などにおいて感度調整が容易である特長を有しています。さらに積分周期を長くすると、センサ信号に対してアナログスイッチで生じるノイズの割合を相対的に小さくできます。

一般的な静電容量型水位計において、精度を高める際には水位に対する静電容量の変化を大きくするために電極寸法を大きくする必要があります。しかし電極のノミナル容量が増加し検出回路のノイズが悪化するため、精度が上げられないという問題がありました。一方で本検出回路では式 4 から分かるように容量差をとることでノミナル容量をキャンセルできるため、あらゆる静電容量を精度良く検出できるという利点を有しております。

3. ダイナミックレンジの評価

水は誘電率が高いため、深い水深まで測るためには広い容量検出レンジが必要です。しかしながら単純に増幅率を下げて検出レンジを広げると、回路のノイズフロアに信号が埋もれてしまい分解能が悪化してしまいます。このため回路のノイズレベルがボトルネックとなります。そこで回路ノイズが水位計に求められているダイナミックレンジを満たしているか、ため池の決壊予測で求められている分解能を例に示します。

水深 1 m のため池の水位を測るための平行平板コンデンサを考えます。その電極間は水が入り込むための空洞であり、電極間の比誘電率は 1 程度です。その空洞がすべて水で浸るとすると、常温における水の比誘電率は 74~88 程度であることから、ノミナル値の 100 倍程度の容量変化を検出できることが必要です。ため池の決壊予測は、1 m 長の水位計に対して 1 mm の分解能が求められているため、最大でノミナル値の 100 倍の容量をレンジに収めつつ、最小で 1/1000 の変化を検出できればなりません。よって回路に要求されるダイナミックレンジは電圧比で 100 dB となります。

次に回路のノイズレベルを求めるため、図 1 に示す積分回路段以前に由来する雑音 n_{ev} を以下に示します。k はボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$)、T は室温 300 K とします。ここで U1 の入力電流

ノイズによる R_h の電圧ノイズ、トランジスタ、キャパシタ、アナログスイッチのノイズは無視するとします。オペアンプの入力電圧ノイズを N_{opa} とすると、上記から雑音の電圧スペクトル密度は以下のようになります。

$$n_{CV} = \sqrt{4kTR_h + 4kTR_1 + N_{opa}^2} \approx \text{数十} [nV_{rms}/\sqrt{Hz}] \quad \text{式 5}$$

検出回路に使用している差動増幅回路段を図 3 に示します。設計参考値として、 $R_3=R_4=R_5=R_6=1 \text{ k}\Omega$ とします。すると R_3 による熱雑音 ($=R_4, R_5, R_6$) は、

$$\sqrt{4kTR_3} = \sqrt{4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \times 1 \times 10^3} = 4.07 [nV_{rms}/\sqrt{Hz}] \quad \text{式 6}$$

となります。またオペアンプの入力電流ノイズ (参考値: $0.8 [pI_{rms}/\sqrt{Hz}]$) より R_3 で生じるノイズ N_i は以下のようになります。

$$N_i = 0.8 \times 10^{-12} \times 1 \times 10^3 = 0.8 [nV_{rms}/\sqrt{Hz}] \quad \text{式 7}$$

式 5、式 6、式 7 より、オペアンプ U_3 の電圧ノイズ (参考値: $10 [nV_{rms}/\sqrt{Hz}]$) を考慮にいと、差動増幅回路での総雑音 n_{diff} は次式のようになります。

$$n_{dif} = \sqrt{(2n_{CV})^2 + (2 \times 4.07)^2 + (2 \times 10)^2 + (2 \times 0.8)^2 + 2 \times 4.07^2} < 90 [nV_{rms}/\sqrt{Hz}] \quad \text{式 8}$$

次にサンプルホールド回路を図 4 に示します。ここではキャパシタ、アナログスイッチの雑音は十分小さいため考慮に入れないとします。また R_7 及び R_8 は、 U_{11} によるサンプルホールドの充電時間を考慮して計算した時定数により決定します。設計参考値として、 $R_7=100 \Omega$ 、 $R_8=47 \Omega$ 、オペアンプ U_3 の電圧ノイズ N_{opa} (参考値: $10 [nV_{rms}/\sqrt{Hz}]$) とすると、式 8 よりサンプルホールド回路を通して最終的な回路由来の雑音 n は以下のようになります。

$$n = \sqrt{n_{dif}^2 + 4kTR_3 + N_{opa}^2 + 4kTR_8} = \sqrt{n_{dif}^2 + 1.29^2 + 10^2 + 0.88^2} < 100 [nV_{rms}/\sqrt{Hz}] \quad \text{式 9}$$

帯域幅を 100 Hz とすると式 9 より回路のノイズレベルは -112 dB 以下となり、これは上記の水位計に求められるダイナミックレンジを満たしていることがわかります。

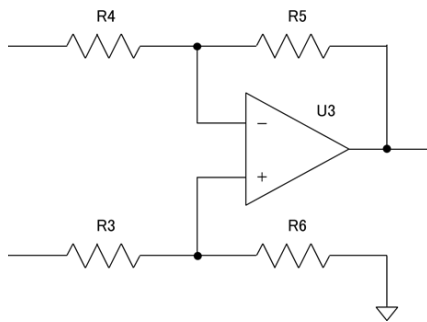


図 3. 差動増幅回路

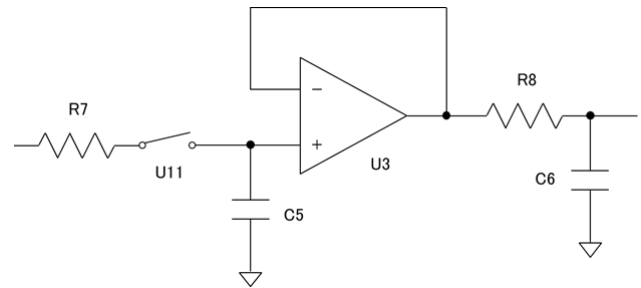


図 4. サンプルホールド回路

4. 水位計の試作

上記で紹介いたしました静電容量検出回路で、水位を測るための試作を行いました。本試作は、PCB (Printed Circuit Board) 上に作製した直線導体パターン間の寄生容量を計測することで水位を検出いたします。その様子を図 5 に示します。導体パターン間に水が入り込むことで、電極間の静電容量が変化し、それが水位に応じたアナログ電圧として出力されます。容量検出回路と検出パターンを同一の PCB 上に設けることで、静電容量センサの長所である省スペース性を活かしております。また静電容量センサの出力は周囲のあらゆる物体によって影響を受けることから、フィールドへの設置方法も踏まえて、ステンレスのシールドパイプ内にセンサを収めております。加えてシールドと検出パターン間の距離のばらつきがセンサ出力に影響を与えるため、3D プリンタで固定治具を作製し、基板がパイプ中央に固定される構造を実現しました (図 5(b))。本試作で用いている静電容量検出回路は、図 1 にあるように容量差が回路出力となっているため、容量検出パターンをセンサ容量とし、もう片方は固定容量を実装しています。

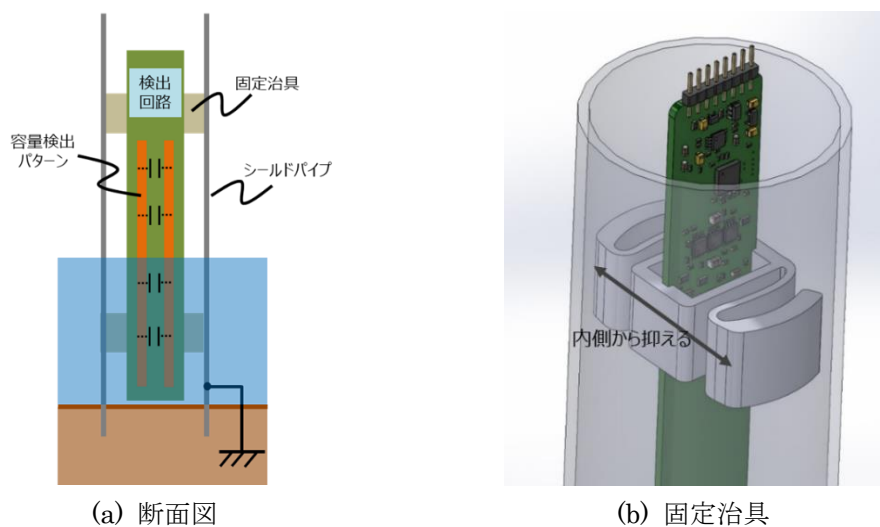


図 5. 静電容量型水位計

水位変化による容量変化を計測する際には、MEMS 素子の容量差を測る際にはなかった特有の問題が生じます。その様子を図 6 に示します。最初に搬送波が送信電極に入力されます。その送信電極から受信電極へと寄生容量を介して電荷を受け渡します。しかしながら水位とともに外部シールド間との寄生成分 Z_x も増加します。上記にあるように本稿で使用している回路では電流を積分しますが、図 6 (b) に示すように受信電極とシールドパイプ間に寄生成分が生じ、グラウンドに電流 I_c が流れてしまうことで、本来の容量変化分を正しく積分値に反映させることができなくなってしまいます。

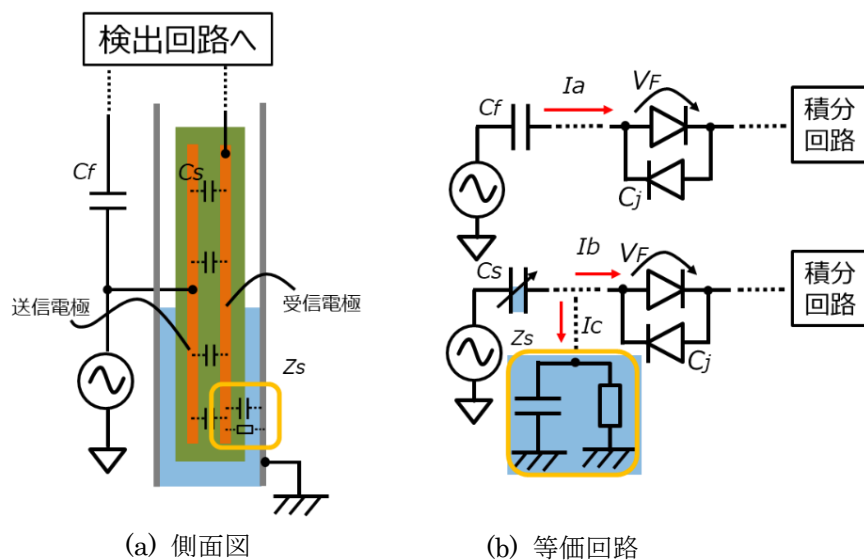


図 6. 水位とともに増える寄生成分の影響

そこで上記で利用している容量検出回路の差分を利用し、固定容量側にもダミー電極を設けることにより、受信電極と等しい寄生成分を生じさせる構造にしました。その様子を図 7 に示します。図 7 (a) にあるようにダミー電極を水位検出部の受信電極と線対称となるように設けることで、シールドパイプ間との寄生成分を等しく作り出しています。よって固定容量側においても水位に応じたパイプ間との寄生成分が加わるため、センサ部との差分をとることによりその成分をキャンセルできます。

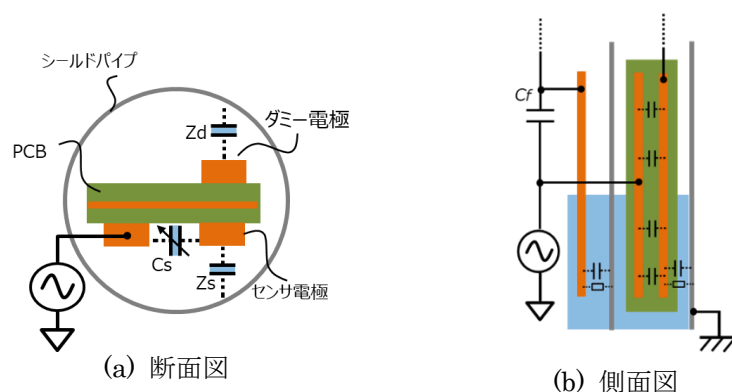


図 7. ダミー電極の付加

図 8 は試作した水位計の評価結果です。ダミー電極の有無による線形性の比較を示しています。ダミー電極を設けない場合は非線形性を示しており、それは水位が増加するとに寄生成分を介して GND に流れる電流が増えていくからであると考えられます。一方でダミー電極を設けた場合はその成分のキャンセルができており、水位換算で 1 mm 以下の非線形誤差に抑えることができました。

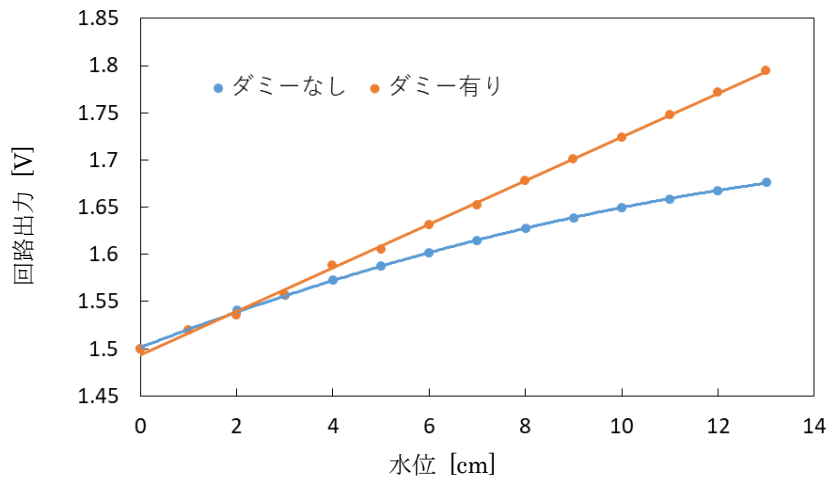


図 8. 水位計出力

5. 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 MEMS 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について報告いたしました。

MEMS 加速度計の静電容量検出回路におけるノミナル容量キャンセル、ならびに低ノイズという特徴を応用することで、誘電率が高い水を深い水深まで測るための高いダイナミックレンジを確保することができました。さらに、外界の影響を低減させるためのシールドパイプと電極間の寄生成分が回路動作に影響を与えるという MEMS 素子の静電容量を測る際にはなかった水位計測特有の課題に対しては、ダミー電極を設けることによりその影響をキャンセルし、その結果水位に対する回路出力の線形性を改善することができました。またパイプの中央にセンサを固定する構造を考案し、シールドと電極間の静電容量のばらつきを抑えることができました。今後は長期安定性、温度特性や耐水性などの項目について検討を進めていくと同時に、フィールド設置による実証実験も進めてまいります。

[参考文献]

- 1) 総務省, “デジタルで支える暮らしと経済”, 令和 3 年版情報通信白書 (2021).
- 2) 環境省, “2050 年カーボンニュートラルに向けた経済社会のリデザイン”, 令和 3 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書 (2021).
- 3) 小野田真二, 天沼伸恵, 森下麻衣子, “コロナ過を克服する SDGs とビジネス~日本における企業・団体の取り組み現場から~”, 一般社団法人グローバル・コンパクト・ネットワーク・ジャパン, 公益財団法人地球環境戦略研究機関 (2021).
- 4) 内閣府, “第 4 回 新型コロナウイルス感染症の影響下における生活意識・行動の変化に関する調査” (2021/11/1).
- 5) 株式会社電通 広報局 広報部, “電通、第 4 回「SDGs に関する生活者調査」を実施” (2022/4/26).
- 6) 国土交通省, 2021/3/31, “令和元年東日本台風の発生した令和元年の水害被害額が統計開始以来最大に令和元年の水害被を公表”, https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_001056.html
- 7) 下條真司, 赤阪晋介, 田淵雄一郎, 田口一徹, “国内外における IoT による社会変革・サービス創出の取り組み”, 情報処理 Vol.60, No.2 (2019).
- 8) 一般社団法人次世代センサ協議会 社会インフラ・モニタリングシステム研究会, “気象災害モニタリングシステムの動向 2020 年度活動報告書”, 一般社団法人次世代センサ協議会 (2020).
- 9) 情報調査会センサ技術編集部, “センサ活用事例集 D 1”, 情報調査会 (1984).