

小規模雨水貯留槽に適した水位計の開発*

笠井 利浩^{*1}, 平野 晋太郎^{*2}

Development of Water-Level Gauge for Small-Scale Rainwater Storage Tank

Toshihiro KASAI^{*1} and Shintarou HIRANO^{*2}

^{*1} Faculty of Environmental and Information Sciences, Department of Environmental and Food Sciences

In this study, we conducted an evaluation experiment of a water-level gauge to be installed in a small-scale rainwater storage tank. Two types of water-level gauges were evaluated, namely, capacitance type (Texas Instruments: FDC2214EVM) and pressure type (Interlink Electronics Inc.: FSR series). The experiment was conducted using a simulated tank made of VU150 PVC pipe. The water-level gauge readings were recorded on an SD card using Arduino UNO. The evaluation was based on the correlation between the measured water level, and water-level gauge measured value, and also based on long-term stability of the water-level gauge measured value. The results demonstrate that the capacitance-type water-level gauge has a higher performance than the pressure-type water-level gauge.

Key Words : Rainwater Harvesting, Water Level Gauge, Rain Water Storage Tank

1. 緒 言

近年、温暖化による異常気象の頻度が高まり、それに伴って雨水貯留槽が果たす役割が多様化している。雨水のもっとも一般的な利用法としては、生活用水への利用が挙げられる。全国各地に一般家庭での雨水利用例があるが、福井県福井市内においても洗車、トイレおよび洗濯にまで活用されている事例がある(図1)。一方で、地方公共団体や地方独立法人に対しては、平成26年に国土交通省から施行された「雨水利用の推進に関する法律」によって水資源の循環の適正化として、第10条～第11条では雨水利用のための施設設置に関する目標が掲げられている⁽¹⁾。雨水利用のその他の役割として、雨水貯留槽の持つ流出抑制効果による都市型洪水緩和に対する期待も高まっている⁽²⁾。これらの事から、雨水貯留槽は今後、様々な施設や家庭での導入が進んでいくと考えられる。またその中でも、数千リットル以下の小規模～中規模の地上設置型雨水貯留槽は、比較的簡単に低コストで設置できるため、特に需要の増加が予想される。しかしながら現状では雨水貯留槽に付随する安価な周辺機器の開発は十分ではなく、雨水貯留槽の利便性向上のための技術開発が求められている。その中でも特に需要の高い周辺機器として、雨水貯留槽用の水位計が挙げられる。

本報では、都市型洪水緩和などの今後雨水貯留槽に期待が高まることを見据えて、IoT技術の導入のために必要となる安価で安定性の高い水位計の開発に必要な水位センサーの評価を行ったので報告する。

2. センサ部位性能比較実験

2.1 実験概要

本実験は、水位計のセンサ部を選定するため、性能の比較検証を行ったものである。具体的な検証方法としては、各センサの計測値と水位間の決定係数(以下、「R²値」)を性能の評価指標として比較を行った。評価対象センサとして、計測対象や検出部の違いから、静電容量式センサと圧力センサの二種類を選定した。また、計測値

* 原稿受付 2019年3月29日

^{*1} 環境情報学部 環境・食品科学科

^{*2} 環境情報学部 環境・食品科学科 3年

E-mail: kasai@fukui-ut.ac.jp

の処理と動作管理は、計測値の A/D 変換や SD カードへ記録する際の回路の効率化を考慮し「Arduino UNO」および「Arduino Wireless SD Shield」を採用した (図 2)。

2.2 評価対象センサ

2.2.1 静電容量式センサ

静電容量式センサは、二つの電極間に発生する静電容量を計測するセンサである。静電容量とは、空間に配置している絶縁された二つの電極間に蓄えられる電荷の量であり、式 (1) の式で表すことができる。

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (1)$$

C : 静電容量 (電気容量) [F], ϵ : 誘電率 [Fm^{-1}], S : 極板面積 [m^2], d : 極板距離 [m]

極板面積と極板間距離が一定条件である場合、静電容量は電極間に生じる誘電率の影響を大きく受ける。従って、この電極間に、大気と異なる誘電率を持つ水のような絶縁体性物質が存在した場合、静電容量が変化する。従って、静電容量センサはこの変化を利用して水位センサとして機能している。静電容量式センサの特徴は、非接触型である点にある。従来の水位センサでは、検出部に使用する金属電極が水に長期間に接触することにより徐々に腐食するなどして起こるセンサの動作不良等が問題となる。一方、電極が水に直接触れない静電容量式センサにはこの問題が起こらず長期間の使用が可能である。本実験で使用した静電容量式センサは、TEXAS INSTRUMENTS 社製の「FDC2214 EVM (Evaluation Module)」である (図 3)。FDC2214 EVM は、最大 28 bit の高分解能を持つ静電容量式センサ「FDC2214」を搭載した評価モジュールである⁽³⁾。また、日本円で 3000 円程度で購入できることから、一般的な高性能水位センサよりも低コストでの開発が可能となる利点も有している。FDC2214 EVM の水位検出部には、1.6 mm VVF ケーブルを 2 m に切断し、槽内に浸漬する端部をシリコンシーラントで防水処理したものをを用いた。



図 1 福井市内に設置されている雨水タンク



図 2 Arduino UNO と Arduino Wireless SD Shield

2.2.2 圧力センサ

圧力センサは、検出部に加えた圧力を計測するためのセンサである。水位センサとして活用する場合、水圧の大きさに反比例した抵抗値の変化によって生まれる電圧値の変化で水位を捉えることができる。センサを貯留槽に導入する上で、貯留雨水の水質や内部形状の変化は時折センサの正常動作の妨げになることがある。しかしながら、圧力水位センサは検出部に生じる水の圧力のみが値に反映されるため槽内環境の影響を強く受けにくい。また、設置方法や回路が単純なことから、設置条件が少ないことも特徴の一つである。本実験で使用した圧力センサは、Interlink Electronics Inc.社製の「FSR (Force Sensing Resistors)」である (図 4)。FSR は、1 機当たりの値段が 1500 円未満にも関わらずノイズの影響を受けない PTF (polymer thick film) デバイスである。なお、FSR による抵抗値の変化は、センサ部が水圧で加圧された際に検出部表面の電極が底部のカーボンシートに接触して導通することで電気抵抗が低くなることによって起こる。従って、検出部面積の違いによってセンサ部の電極とカーボンシートの接触面積が異なることを考慮し、FSR の中で感知面積が最小である FSR400 と最大である FSR408 を評価対象センサとして選定した。

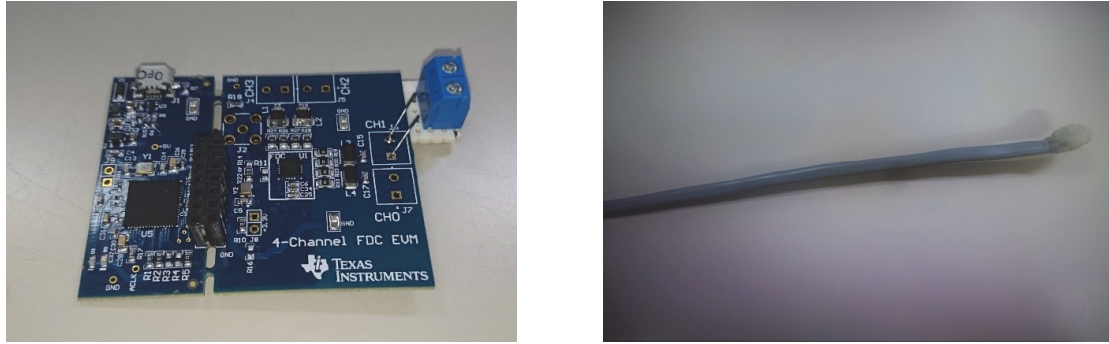


図3 実験に用いた静電容量式センサ（左：FDC2214EVM，右：1.6 mmVVF ケーブル）

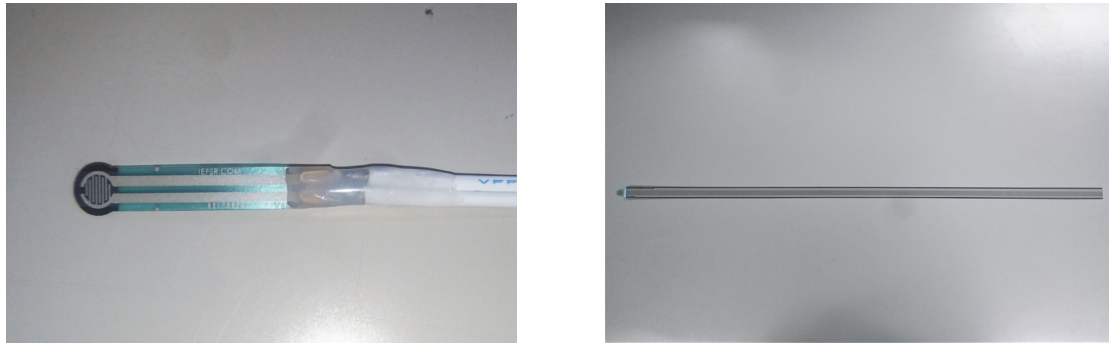


図4 実験に用いた圧力センサ（左：FSR400，右：FSR408）

2.3 実験方法

ArduinoUNO と各センサを組み合わせた模擬水位計を作製し，VU150 PVC パイプ製の模擬タンクを小規模雨水貯留槽と見立てて実験を行った．比較検証を行った各センサの仕様を，表 1 に示す．また，外部から水位を目視するために，模擬タンク底部に透明チューブを接続した．槽内水位は，模擬タンク上部からの給水と，透明チューブからの排水により調整した．実際に用いた実験装置を，図 5 に示す．計測は，水位が 25 cm，50 cm，75 cm，100 cm，125 cm，150 cm の各 4 回計測し，Arduino Wireless SD Shield を介して SD カードに記録した．また，記録した計測値の平均を，各センサの計測値として扱った．

2.4 結果および考察

各センサの計測値と水位との R^2 値を，図 6 に示す． R^2 値は，FDC2214EVM が 0.9832，FSR400 が 0.9706，FSR408 が 0.191 であった．また，FSR408 の全長が約 70 cm であることから，70 cm 以上の水位では圧力の負荷の傾向に変化が出ると考え，75 cm を満水位と仮定した場合の評価も行った．従って，満水位 75 cm と仮定した場合，各水位の R^2 値は FDC2214 EVM が 0.9933，FSR400 が 0.9470，FSR408 が 0.8656 となった（図 7）．上記の実験結果より，FSR408 では，75 cm を満水位とした場合と 150 cm を満水位とした場合では大きく R^2 値が変化していた．この FSR408 における R^2 値の違いは，センサの設置条件によるものと考えられる．本実験では，計測部位へのねじれ等による負荷を防ぐために模擬タンク底面に垂直となるよう FSR408 を設置した．しかしながら，FSR408 の高さが 70 cm であることから，75 cm 以降の計測値ではセンサ全体にかかる水圧変化が 70 cm 以下とは異なるためであると考えられる．また，同様の圧力センサである FSR400 についても，静電容量式のセンサより R^2 値が低い値であった．この要因は，FSR400 への負荷の変動値に問題があったと考えられる．各水位において感知部位に生じた水の重量は，式 (2) で求めることができる．

$$\text{感知面積における水の重量 (N)} = (\rho hg + p_0) S \quad (2)$$

S : 感知面積 [m^2]， h : 水位 [m]， g : 重力加速度 [m/s^2]， ρ : 水の密度 [g/cm^3]， p_0 : 大気圧 [N/m^2]

圧力式水位センサの特性として，大気圧の変化による影響が挙げられるため以下の検討を行った．FSR400 の感知面積が 20.2 mm^2 ，実験日の福井県福井市の平均気圧が 1022.4 hPa であり，仮定として重力加速度を 9.8 m/s^2 ，

水の密度を 1.0 g/cm^3 とした場合、本実験における水の重量の最低値と最高値の差は僅か $2.47 \times 10^{-5} \text{ N}$ であった。FSR400 の圧力感知範囲は 0.1 N から 20.0 N であり、 $2.47 \times 10^{-5} \text{ N}$ 程度の微細な変化では計測値への反映が十分に出来なかったと考えられる。この要因に関しても仮定条件や水位が不変の値として扱う場合、感知面積の小ささが変化域の縮小に繋がったものと思われる。従って、FSR を水位センサとして利用する場合、センサの設置状態や感知面積により、計測値に多少の影響が生じることが分かった。一方で、静電容量式のセンサは、検出部の十分な面積と FDC2214 の高分解性能から、水位の微小な変化を捉えた計測と良好な R^2 値を記録していた。以上のことから、各センサの水位と計測値の相関性を評価した場合、静電容量式のセンサが他の二機より優れていることが明らかとなった。

表 1 評価対象センサの仕様

Sensor	FSR400	FSR408	FDC2214
Manufacturing Company	Interlink Electronics Inc		TEXAS INSTRUMENTS
Serial number	180515D0303	180713D0009	296-42296-ND
Measurement type	Pressure formula		Capacitive formula

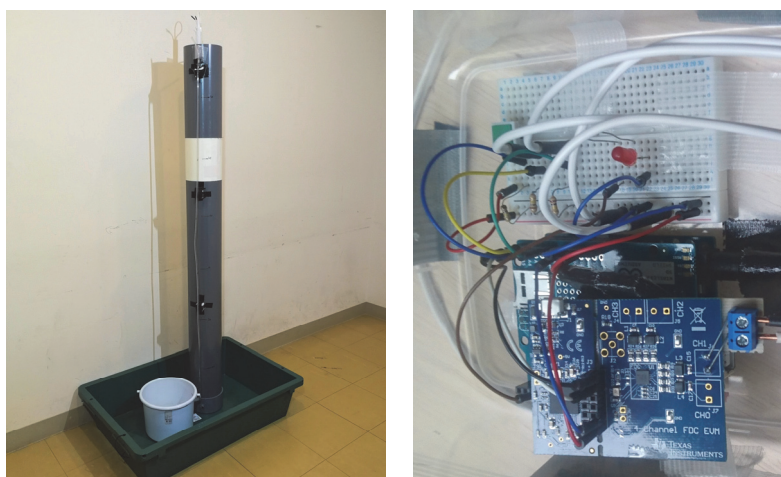


図 5 作製した実験装置 (左: 模擬タンク, 右: 模擬水位計)

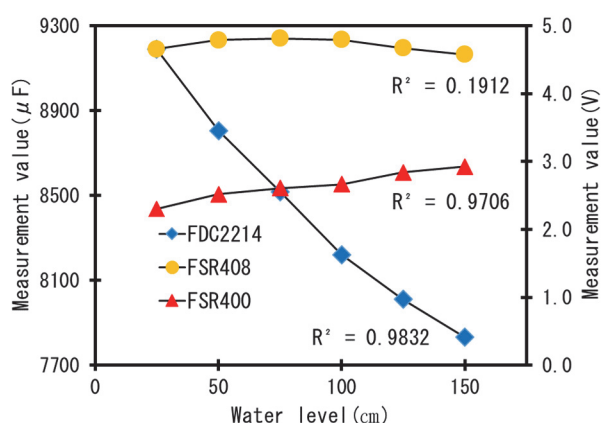


図 6 センサ部位性能比較実験結果
※満水位 150 cm の場合

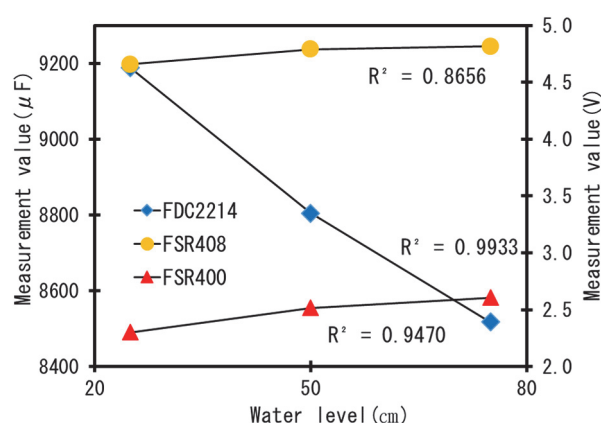


図 7 センサ部位性能比較実験結果
※満水位 75 cm の場合

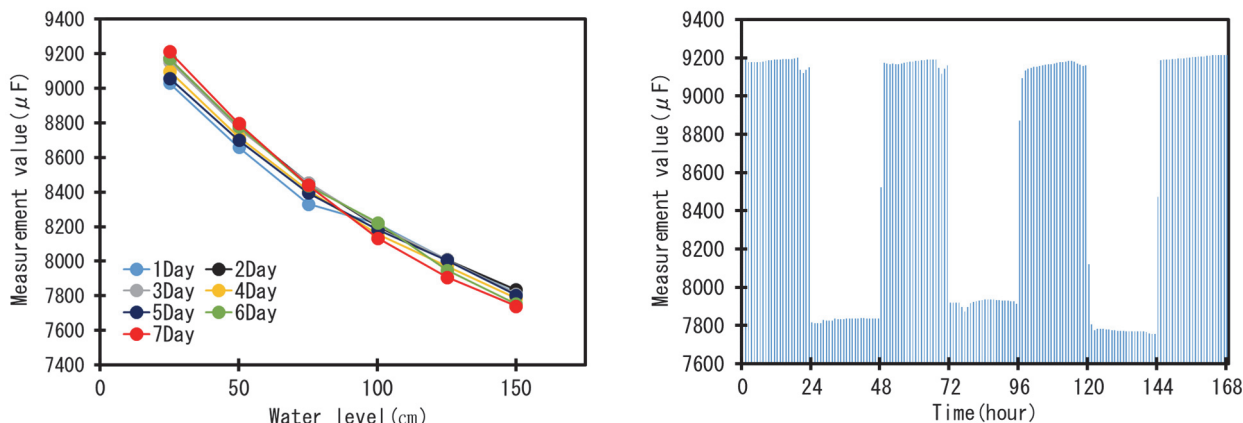
3. 動作安定性評価実験

3.1 実験概要

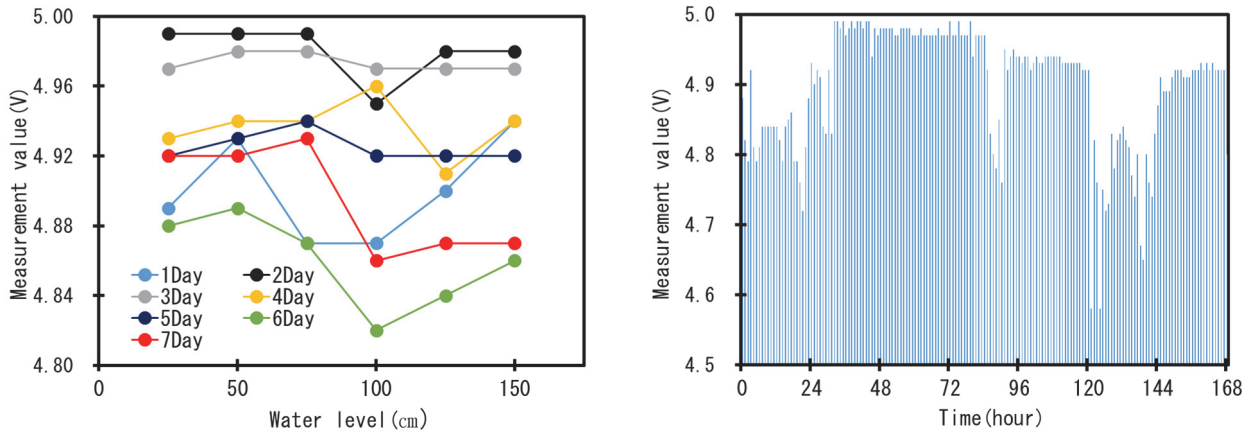
長期間における各センサの動作安定性と計測値の再現性の評価を行い、動作安定性検証実験を行った。検証方法は、2. 性能検証実験と同様の実験装置で1時間ごとの計測を1週間行い、一定水位における計測値の再現性と動作を評価した。また、24時間ごとに水位変動と計測を行い、各水位における安定性についても評価した。

3.2 結果および考察

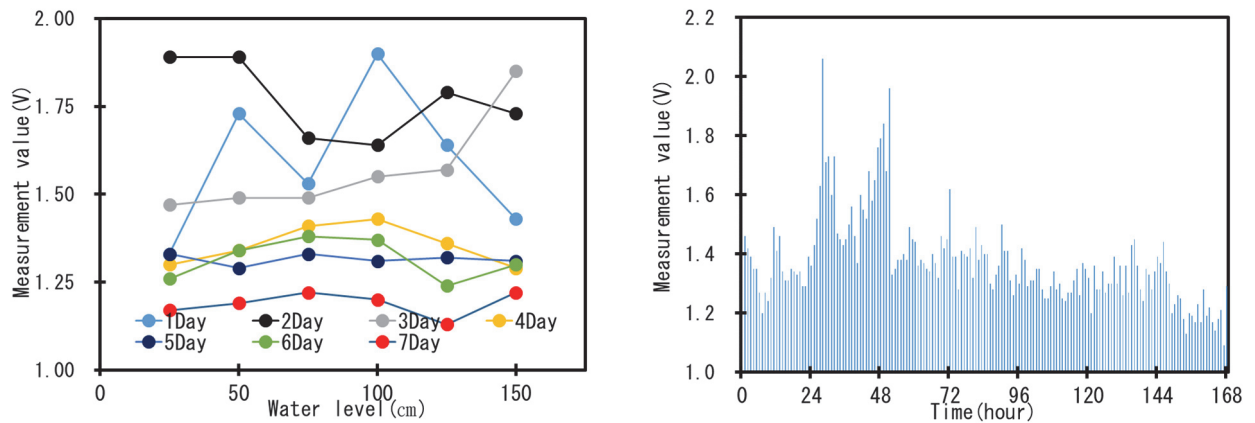
各センサの1時間ごとの計測値と24時間ごとの日別における計測値を、図8に示す。実験結果から、FSR400とFSR408の1時間ごとの計測値において、水位の変動があったにもかかわらず反応が確認されない日があった。また、24時間ごとの計測値についても、値の再現性および変動傾向共に不規則であった。一方で、FDC2214EVMの1時間ごとの計測値は、データ群が9200 μF 付近に4つ、7800 μF 付近に3つ確認され、24データの等間隔で交互に偏在していた。同様に、24時間毎に計測した各水位の計測値を見ても、値の変動傾向と再現性が前述の圧力のものより高いことが明らかである。この圧力センサと静電容量式センサに生じた性能差は、大気圧の影響が関係していることが示唆される。圧力センサの計測値に、実験日ごとの大気圧が影響するのは式(2)より明らかである。一方で、後者の静電容量式センサは、センサ部周辺の誘電率変化に大きく依存するため大気圧による影響は考えにくい。従って、圧力センサの二機へ大気圧の影響評価を行った。動作不良の可能性が低い1日目および2日目における水位100 cmの計測値の差を、同日の期間中において気象庁から発行された大気圧の値⁴⁾の差で割った場合、1 hPa当たりの計測値の変動はFSR400が 2.28×10^{-2} V/hPa、FSR408が 2.11×10^{-2} V/hPaであった。この1 hPa当たりの変動値から、大気圧を標準気圧の1013 hPaに合わせ計測値を補正をした場合、FSR400の R^2 値には大きな変化は見られなかったが、FSR408の R^2 値は大幅に増加した(図9)。従って、今回選定した圧力センサを長期間正常に動作させるためには、大気圧の影響を加味する必要があることが示唆される。しかしながら、仮に大気圧の影響を水位計に適用させる場合、装置へ大気圧を読み取るための新たな評価キットが必要となり、費用と設置条件の増加が懸念される。また、第2章で述べたようにFSRの R^2 値が補正後の値よりも高いことから、大気圧以外の他の要因による影響も示唆される。以上のことから、長期的な動作の安定性を評価する場合、本実験結果により静電容量式のセンサが優れていると考えられた。



FDC2214EVM の計測結果



FSR400 の計測結果



FSR408 の計測結果

図8 安定性評価実験結果 (左：日別の計測値の推移, 右：1時間ごとの計測値の推移)

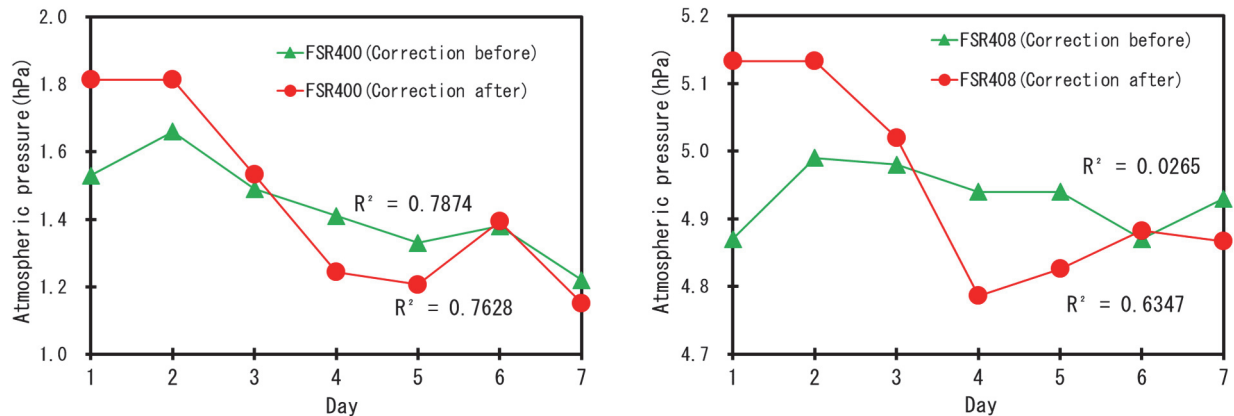


図9 大気圧による計測値への影響 (左：FSR400, 右：FSR408)

4. 結 言

本報では、小規模雨水貯留槽に向けた水位計の開発を行った。その結果、他のセンサより水位と高い相関性を有し、長期間の稼働においても動作が安定していた静電容量式センサが、水位計導入に最適であることが分かった。今後の展望として、静電容量式センサの測定精度を評価する上で重要な比誘電率に着目し、水温の変化における計測値への影響評価や比誘電率の自動補正を可能とする補正システムの構築を検討している。また、IoT 対応型水位計の開発についても、現在並行して進行中である。その一例として、開発中の水位計を、図10に示す。この装置では、容器の全長に対して水位が占める割合を7セグメントLEDで表示すると同時に、定期的に水位を

Sakura.io が提供するプラットフォーム上に送信している (図 11)。しかしながら、現状では回路の単純化やプログラムの軽量化等の課題があるため、引き続き IoT 対応型水位計の改良を続けていく方針である。

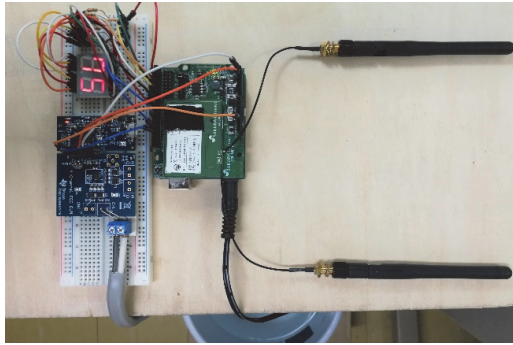


図 10 現在開発中の水位計

時刻	デバイスID	データ値	単位	値
2019-04-09T04:28:24.8888876+09:00	u528R7cu0D	0	cm	0.00
2019-04-09T04:27:54.8888872+09:00	u528R7cu0D	0	cm	0.00
2019-04-09T04:27:24.8888868+09:00	u528R7cu0D	0	cm	0.00
2019-04-09T04:26:54.8888864+09:00	u528R7cu0D	0	cm	0.00
2019-04-09T04:26:24.8888860+09:00	u528R7cu0D	0	cm	0.00
2019-04-09T04:25:54.8888856+09:00	u528R7cu0D	0	cm	0.00
2019-04-09T04:25:24.8888852+09:00	u528R7cu0D	0	cm	0.00
2019-04-09T04:24:54.8888848+09:00	u528R7cu0D	0	cm	0.00
2019-04-09T04:24:24.8888844+09:00	u528R7cu0D	0	cm	0.00
2019-04-09T04:23:54.8888840+09:00	u528R7cu0D	0	cm	0.00

図 11 Sakura.IO プラットフォーム画面

文 献

- (1) 国土交通省, 雨水利用の推進に関する法律について, <http://www.mlit.go.jp/common/001048583.pdf> (参照日 2019 年 3 月 29 日) .
- (2) 越川康夫, 村川三郎, 西田勝, 雨水利用システムにおける雨利用効率と都市型洪水防止効果の検討 福岡市の戸建て住宅を事例として, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 452 (1993), pp.37-45.
- (3) 株式会社 TEXAS INSTRUMENTS, FDC2x1x データシート, <http://www.tij.co.jp/jp/lit/ds/symlink/fdc2214.pdf>, (参照日 2019 年 3 月 29 日) .
- (4) 国土交通省気象庁, 各種データ資料, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (参照日 2019 年 3 月 31 日) .

(2019 年 4 月 26 日受理)