

報告

電線を埋設して浸水や空洞化を検知する静電容量型センサの提案

Proposal of Capacitance Sensors to Detect Immersion and Cavitation

上野 勝利 (うえの かつとし)

徳島大学大学院 准教授

e-mail: ueno@ce.tokushima-u.ac.jp

高原 利幸 (たかはら としゆき)

金沢工業大学 准教授

渦岡 良介 (うずおか りょうすけ)

京都大学防災研究所 教授

キーワード：浸水，空洞化，静電容量，土構造物，維持管理，斜面

1. はじめに

谷埋め盛土や舗装など，浸水によって土構造物に大きな損傷が生じることがよく知られている¹⁾(図-1²⁾)。そこで斜面，護岸構造物や土構造物，舗装などの浸水や空洞化による損傷を初期の軽微な段階で検出することを目指して，測定技術の開発を行っている²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。提案する方法は，図-2 に示すように地中にセンサ電極となる電線を埋設し，静電容量や高周波信号の伝搬特性を測定することにより，土の浸水や空洞化といった状態変化を検出するものである。護岸や堤防，道路や盛土などの長延長な土構造物に埋め込むセンサの要件として，i)測定範囲が広いこと，ii)単純な構造で長寿命・長期安定が期待できること，iii)締固めなどの施工の障害とならないこと，iv)遮水性などの構築された土構造物の性能劣化要因とならないこと，v)埋殺しとなるため化学的にも安定で環境負荷が低いこと，などが必要である。計測点が多数となるため廉価であることも重要である。静電容量を利用した計測はこれらの要求に合致するものであり，本稿ではその紹介を行う。

2. 静電容量の測定方法

絶縁された2つの導体を電極とし，それらの間に電圧 V を印加すると，電荷 Q が蓄積される。電荷を蓄積する機能を持ったものはコンデンサあるいはキャパシタと呼ばれ，電荷を蓄積できる能力を静電容量 C という。静電容量の値は電極の形状や間隔などの諸元と，



図-1 高潮による防波堤裏込の空洞化被害²⁾

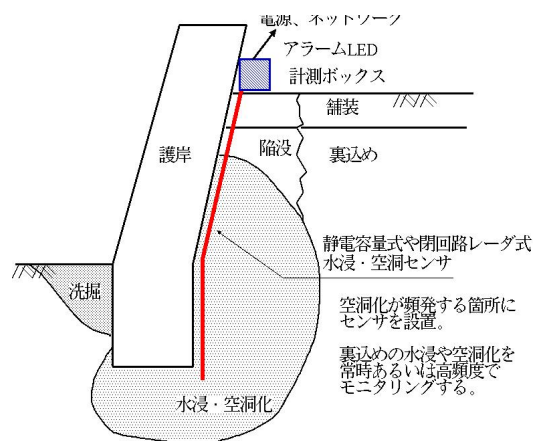


図-2 センサ電極の設置案

電極間の物質の比誘電率 ϵ_r によって決定される。例えば面積 a ，間隔 d の平行平板型キャパシタの静電容量は，式1のようにあらわされる。

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 f (\text{電極の諸元}) = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{a}{d} \quad (1)$$

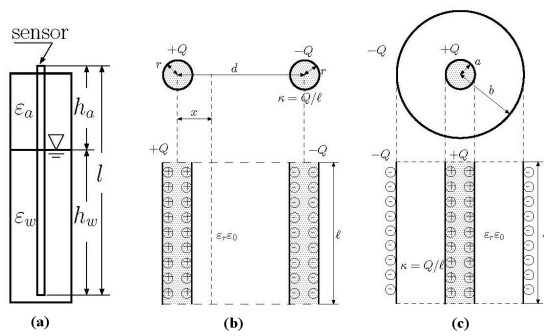


図-3 浸水計、水位計とセンサ電極

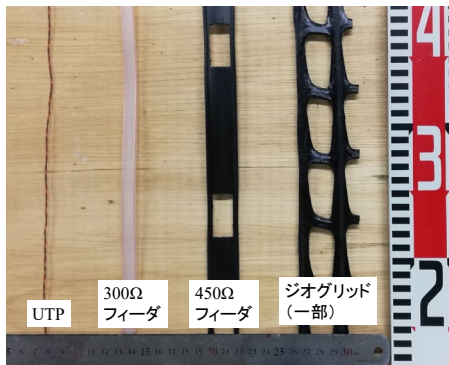


写真-1 センサ電極の例

比誘電率とは、真空の誘電率 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ (F/m) に対するその物質の誘電率の比をいう。乾燥空気の比誘電率はほぼ1であるのに対して、水の比誘電率は80.4、乾燥した土の比誘電率は3程度であり、湿潤状態の土の比誘電率は含水状態によって変化する。加えて純水でなければ水は電気伝導性を持つため、絶縁体内の一部を短絡したような効果も生まれる。したがって静電容量の変化を正確に測定することによって、地中に埋設した電線を用いて斜面の含水状態の変化、土構造物の浸水や空洞化等を検知できる。

図-3 は浸水・水位計として利用する場合のセンサ電極を示したものであり、写真-1 はセンサ電極に用いる電線の例を示している。センサ電極の形状には平行2線型や同軸型などがある。平行2線型は土との親和性がよい反面、そのままでは外来雑音の影響を受けやすい。その反対に同軸型は外電極がシールドとなるため外来雑音の影響をほとんど受けない代わりに、土との親和性や施工性は前者に劣る。用途に応じて適した電極を用いるとよい。

電極の防水・絶縁に用いる材料はポリエチレンやテ

フロンなど化学的、電磁氣的、機械的に安定な材料がよい。UTP はフッ素樹脂 (ETFE) 電線による撚り対線であり、ツイストによって電磁誘導がキャンセルされるため平行線に比べて外来雑音の点で有利である。主に水位計に用いている。浸水や空洞化のセンシング用には、300Ωあるいは450Ωのポリエチレン被膜のファイダ線を用いている。HDPE 製ジオグリッドのリップ中に導体を埋め込み、平行2線型電極とすることも試みられている⁶⁾。シールドを有する電極では長さに制約はない。シールドを有さない平行2線型の電極を用いた場合、雑音の影響が許容できる電極の長さは今のところ4m程度までである。

静電容量の測定には、キャパシタの充電時間から静電容量を求める方法を用い、4.0fF ないしは3.3fF という高い分解能を保ちつつ、32bit という実用上、上限の制約のない広いレンジを持つ静電容量計を開発した。回路の吟味を行い、環境の温度変化や水中の塩分濃度の影響を受けにくいよう工夫している²⁾⁷⁾。

土構造物の長期モニタリングを行う上で、故障要因となるセンスアンプは交換できるよう地上に設置し、埋設部は単純なセンサ電極のみとしたい。しかしながらセンサ電極とセンスアンプ間を接続するシールドケーブルも1m当たり60~100pF程度の静電容量を持ち、計測上の障害となる(図-4)。ただし、高い分解能と安定度を保ちつつ、広い範囲にわたって線形性が保たれれば、ダミーの同軸ケーブルの静電容量も同時に測定して値を差し引くことにより、ケーブルの静電容量の補正は容易である。さらにボルテージフォロウと呼ばれる回路を追加し、接続ケーブルが有する静電容量をアナログ的にキャンセルする回路も考案した⁸⁾。

開発した静電容量計の線形性とキャンセル機能の検証を行った結果を図-5 に示す。検証ではセンサの代わりに温度特性などが良好なCH級積層セラミックキャパシタ(静電容量の公称値は1.3, 10, 100, 200, 470pFを各1個および820pFを2個)と、高信頼な同軸ケーブルであるRG-59B/U(静電容量67pF/m)を用いた。それぞれのキャパシタを同軸ケーブル(長さ1, 2, 3, 6, 11, 21, 31 および51m)を介して、キャンセル機能ありなし2種のセンスアンプに接続し、得られるカウント値を記録した。なおカウント値とは、充電時間を計測

するために用いたクロックのカウント数である。

キャンセル機能なしの場合、同軸ケーブルの長さ毎に回帰分析を行ったところ、係数は 321.33 ~ 327.06(count/pF), $R^2=0.9999$ であった。複数の同軸ケーブルをコネクタを用いて延長したため、若干上に凸なプロットが見られるものの、切片の値もほぼ同軸ケーブルの長さの一次関数となった。一方、キャンセル機能ありの場合、すべての同軸ケーブルをまとめて行っ

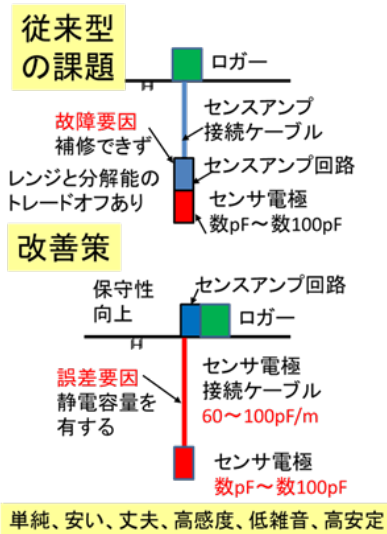
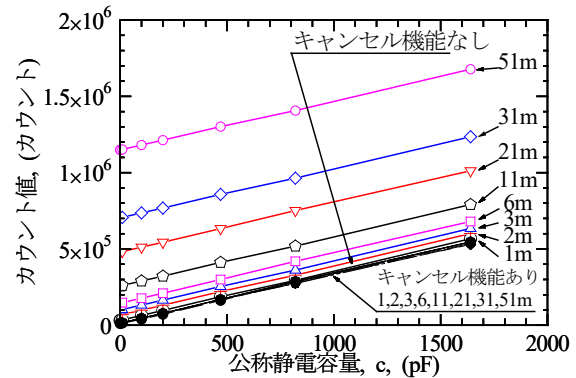


図-4 従来型の課題と改善策

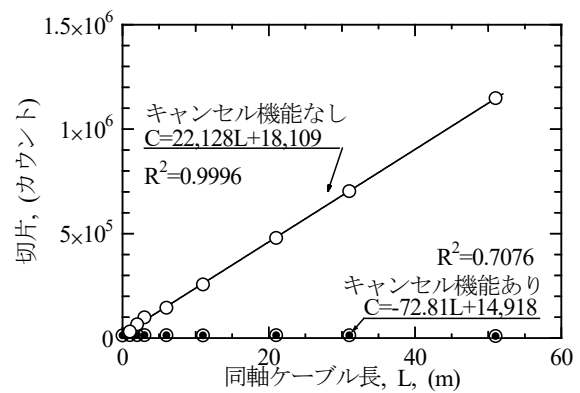
た回帰分析の結果は、係数が 321.44(count/pF), $R^2=0.9998$ となり、キャンセル機能なしの結果と同等の値を示した。図-5(b)から同軸ケーブル長が 0m の時のカウント値はキャンセル機能なしの場合、18,109 であり、キャンセル機能ありの場合の切片は 14,918 となった。静電容量の値にして 60~49pF である。用いた IC の入力端子の静電容量は 25pF 程度であり、基板その他から生じる浮遊容量を考えると、上記の値は妥当である。したがって、数 pF~数 100pF 程度の出力のセンサに 51m の同軸ケーブルを接続しても、センサの出力を正しく測定できることが確認できた。また、装置の限界までの確認はできなかったが、170 万カウント程度まで 1 カウント当たり約 3.3fF の分解能を保ちながら高い線形性を確保していることが確認できた。

3. 空洞化の検出実験

電線を埋設しその静電容量を測定することによって

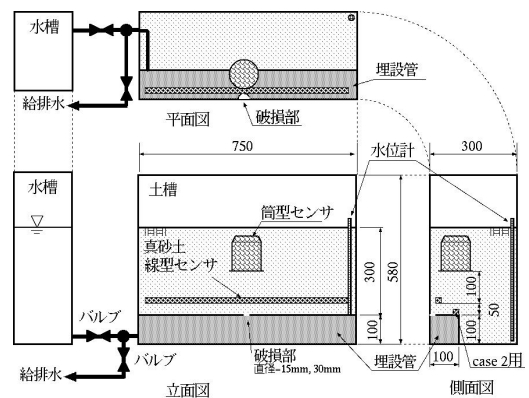


(a) センサ測定値に対する線形性



(b) 同軸ケーブル長に対する線形性

図-5 線形性と浮遊容量のキャンセル機能⁸⁾



単位(mm)

図-6 浸水・空洞化実験装置⁴⁾

浸水や空洞化を検出できるか確認するため、室内模型実験を行った。図-6 に示すように、土槽内に締めつけた真砂土からなる模型地盤を作成し、下部に損傷した埋設管を模した角パイプを設置した。埋設管の上には直径 15mm あるいは 30mm の半円形の損傷部を観察

面に接するように設けた。センサ電極として写真-1に示した特性インピーダンスが 300Ω のフィーダ線を水平に埋設した。埋設管に給水・排水の繰り返し履歴を与え、フィーダ線の静電容量（カウント値）を測定した。

給水・排水繰り返しを与えることにより、徐々に空洞が発達し、最終的には地表面まで到達した。その過程でフィーダ線の一部が空洞内に露出した（写真-2）。

カウント値の時刻歴を図-7に示す。目視では125分頃から空洞が観察された。空洞未発生個所では、給水・排水の繰り返しの進行に伴い、測定値が一定の値に収れんして行った。一方、空洞発生個所では、空洞



写真-2 発生した空洞と露出したフィーダ線⁴⁾

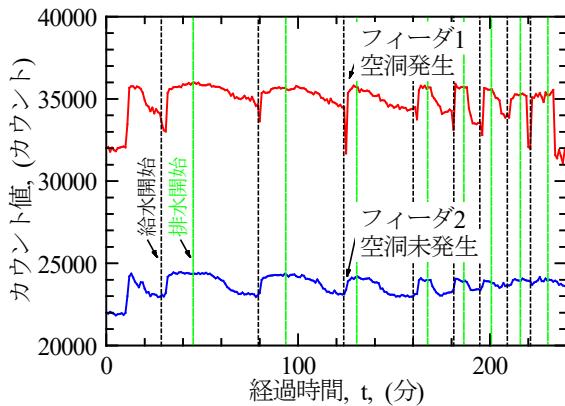


図-7 カウント値の時刻歴⁴⁾

の発達とともに給排水の切り替わり時のカウント値の変化が大きくなっていった。特に空洞未発生個所では排水過程の終盤では測定値はほぼ一定となっていることに対して、空洞発生個所では急峻なノッチが見られることが大きな違いである。

浸水や空洞化の生じていない地中にフィーダ線を埋設し常時測定を行うと、降雨等によってわずかな変動はあるものの、やがて測定されるカウント値はほぼ一

定の値を示すようになる。測定されたカウント値は静電容量と線形関係にあるが、地盤工学的には普遍的な意味はない。水位や含水比など、あらかじめ地盤工学的に意味のある量と静電容量の関係を検定しておく必要がある。図-7の実験結果では、カウント値と地盤の浸水状態を関連づけるために、式2のように相対静電容量 $C_r(\%)$ を定義した⁹⁾。

$$C_r = \frac{C_{\text{地中}} - C_{\text{空気中}}}{C_{\text{水中}} - C_{\text{空気中}}} \times 100(\%) \quad (2)$$

ここで、 $C_{\text{空気中}}$ はセンサ電極全体が空気中にある時の測定値、 $C_{\text{水中}}$ はセンサ電極全体が水中にある時の測定値、 $C_{\text{地中}}$ はセンサ電極を地中に埋設し目的となる測定を行ったときの測定値である。 C_r は、センサ電極を敷設した延長上での地盤の浸水率を意味している。

写真-2に示すように埋設したフィーダ線の周辺で空洞が形成されると、豪雨などの水位上昇時に空洞が浸水し、 C_r の増分 ΔC_r が生じる。この値に着目し空洞寸法の推定値 w_e を式3のように算出する。

$$w_e = \frac{\Delta C_r \times l}{100} \quad (3)$$

ここで l は埋設したフィーダ線の長さである。

図-8は目視によって観察された空洞の幅と式3による評価値の比較を示している。図-8中のフィーダ1は空洞の影響の及ぶ範囲に埋設されたフィーダ線であり、フィーダ2は影響の及ばない範囲に埋設されたフィーダ線である。空洞の影響の及ばない場合、浸水・排水の繰返回数とともに推定値は減少している。一方、

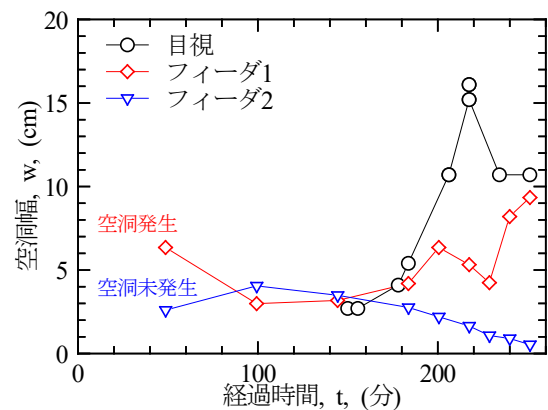


図-8 空洞寸法の推定⁴⁾

影響の及ぶフィーダ1では、目視による値の増加とともに推定値が上がっている。なお230分付近の低下は、空洞天盤からの崩落土によりフィーダ線が埋没したためである。実際の現場のように先見情報がない場合、短期の計測値のみから空洞の発生を確定することは難しいだろう。しかしながら、地中にセンサ電極となる電線を埋設してその静電容量を測定し、自点や他点の計測履歴との比較をおこなうことにより、浸水や空洞化といった変状の検知は可能であることが分かった。

なお浸水や空洞化の個所や範囲の同定には、埋設したフィーダ線を伝送線路とする閉回路レーダ法を適用するよう、開発を行っている¹⁰⁾。

4. 現場計測例

静電容量型センサの現場計測への適用例として、豪雨の際に民地と市道にまたがって発生した地下空洞内の地下水位測定例を紹介する¹¹⁾¹²⁾。市道側は発災直後に土嚢によって埋め戻されたものの、民地側は建物除却後残置された基礎スラブ下に空洞が放置されたままになっている。サウンディングの結果から、市道の土嚢の下にも空洞の存在が懸念される。空洞や周辺地盤の浸水状況を把握するため、空洞底面の地中から基礎スラブ面にわたる長さ3mの静電容量型水位計を設置した。図-9に設置の状況を示す。空洞底面はTP -0.4m

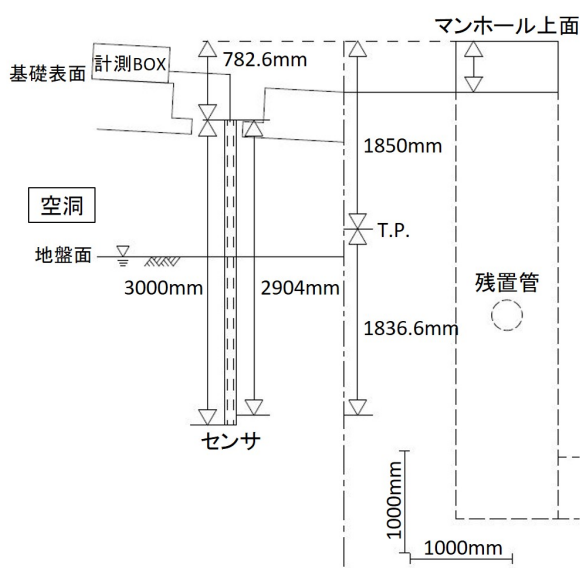


図-9 2019年の水位計の設置状況¹²⁾

程度の深さにあり、設置時の目視による観察では、ほぼ地下水面と一致していた。水位計は給水用三層管の側面に通水孔をあけ、内側にUTP線を展開し3m計としたもので、中間のアルミ層をシールドとして利用している。

図-10は水位計の検定結果である。約0.85mの往復の水位変化を与えて校正係数を決定した。前述のように水位計電極の他にダミーの同軸ケーブルのカウント値も同時に測定し、両者の差を縦軸に示している。回帰分析の結果から、高感度で線形性のよい水位計であることがわかる。TP基準に対するオフセットは、設置の際に別途測定した水位から決定した。

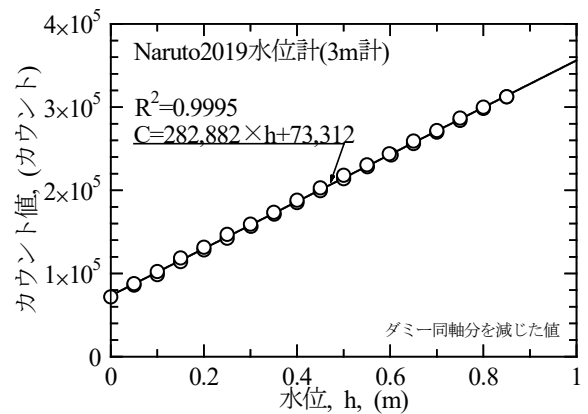


図-10 水位計の検定結果¹²⁾

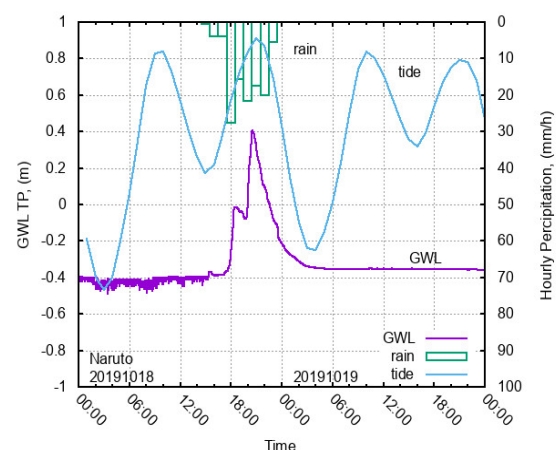


図-11 空洞内の地下水位

図-11は顕著な水位変化が生じた2019年10月18日から同19日の測定結果を示したものである。グラフにはTP基準の地下水位の他、1時間ごとの降雨量と小

松島港の潮位もともに示している。サイトは臨海部であるものの、地下水位に明確な潮位の影響は見られない。これまでの観測から降雨のない時期の地下水面は TP-0.4 m 前後であり、年に数回豪雨の際に地下の水流が生じ、空洞内が浸水して数 10cm 以上の水位変動が生じていることが分かった。空洞最深面と平常時の地下水面はほぼ同程度のレベルにある。現場の地盤条件は緩い砂地盤の上に 70 cm 程度客土された地盤であることを考慮すると、空洞への浸水・排水繰返し履歴により、空洞がさらに発達する可能性が高い。しかしながら、諸般の事情から復旧の目途は立っていない。閉回路レーダや地中に直に埋設したフィーダ線の観測とともに、空洞の経過観察を続けていく予定である。

なお同じ原理の静電容量型水分・水位計は、高原ら (2018) のタンクモデルを用いた土砂災害警戒基準に関する研究¹³⁾に用いられており、現場計測の蓄積がなされている。

5. おわりに

筆者らは地盤工学に関する計測に静電容量型センサが活用できるよう、高分解能(3.3fF)、高安定、広レンジ(32bit)な静電容量計を開発し、模型実験や現場計測への適用を探ってきた。特に電池や電子部品の寿命の制約を受けることもなく、一度埋設すれば構造物の寿命までセンサを維持できることを重点に据えてきた。

安定した精度の良い計測には、電極の防水や電源の安定のほか、適切なアースやシールドの設置など試行錯誤が必要となる場合もある。幸い本稿で紹介したように、最近ではノウハウも蓄積され安定な計測が行えるようになってきた。静電容量を利用すると単純な構造の電極を用いて、変位など他の種々の量の計測も可能になる⁷⁾。谷埋め盛土の浸水管理にも有効と考えている。ぜひいろいろなアイデアで、地盤の診断に静電容量計を活用していただきたいと考えている。

謝辞

村田芳信岐阜大学客員教授から、雨量計作成のご相談をいただいたことが静電容量計開発の嚆矢であった。一連の研究開発には、JST2008 年度シーズ発掘試験を始め、科研費基盤研究 (C) 課題番号 25420506 (代表 :

上野勝利), 同課題番号 20K05032 (代表 : 高原利幸), 同基盤研究(A)課題番号 21H04575 (代表 : 渦岡良介) ほかのご支援をいただいた。また、前田工織株式会社辻慎一朗氏にはジオグリッドへの適用をご検討いただいた。また学生諸君には実験にご協力いただいた。記して関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 例えば国土交通省, 下水道関連 HP, 入手先 http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html (参照 2021.6.23)
- 2) 上野勝利, 高原利幸, 静電容量や誘電率に着目した地盤変状モニタリングの提案について, 60 年のあゆみ, 地盤工学会四国支部 60 周年記念誌, pp. 117-128, (公社) 地盤工学会四国支部, 2019.
- 3) 上野勝利, 高原利幸, 高精度静電容量計の地盤計測への応用, 第 45 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 137-138, 2010.
- 4) 上野勝利, 土構造物の浸水・空洞形成モニタリング装置の開発, 第 15 回 [2011 年度] 助成事業成果報告書, 社団法人四国建設弘済会, 2012.
- 5) Toshiyuki Takahara and Katsutoshi Ueno, In-situ measurements using developed high resolution capacitance type sensor and its performance evaluation, Proc. of the Int. workshop on ICT in Geoengineering, pp. 69-75, 2012.
- 6) 杉岡正晴, 高原利幸, 辻慎一朗, 上野勝利, 補強材を用いた水分測定による補強盛土の健全性評価の可能性, 第 54 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1499-1500, 2019.
- 7) Wenli Lin, Katsutoshi Ueno, Mingroun Shen, Ryosuke Uzuoka and Hisashi Suzuki, Development of Capacitance Displacement Monitoring System and Its Performance Tests, Int. J. of GEOMATE, Vol. 10, No. 2122, pp. 1956-1963, 2016.
- 8) 上野勝利, 渦岡良介, 鈴木壽, 松井雄揮, 石川翔太, 接続ケーブルの浮遊容量の影響を排除した静電容量センサアンプ, 地盤工学会四国支部平成 24 年度技術研究発表会講演概要集, pp. 3-4, 2012.
- 9) 上野勝利, 松井雄揮, 石川翔太, 高原利幸, 地中埋設を考慮した単純な静電容量型浸水・空洞化センサ, 第 48 回地盤工学研究発表会発表講演集(CD-ROM), 論文番号 103, 2013.
- 10) 上野勝利, 霜村潤, 平田祥一, 道浦吉貞, 漏洩位置検出方法, 及び漏洩位置検出システム, 特開 2017-167063, 2017.
- 11) 上野勝利, 林あかね, 高原利幸, 残置雨水管を有する歩道に隣接する民地の地下空洞について, 令和元年度地盤工学四国支部技術研究発表会講演概要集, pp. 85-86, 2019.
- 12) 林あかね, 空洞化を対象とした地盤災害に関する研究, 徳島大学修士論文, pp. 31-46, 2020.
- 13) 高原利幸, 近藤健太, 上野勝利, 並列タンクモデルを用いた災害時降雨パターンを考慮した土砂災害警戒基準の作成に関する研究, 第 61 回地盤工学シンポジウム, pp. 191-198, 2018.

(原稿受理)