

〈論文〉

脱水・乾燥汚泥含水率のリアルタイム計測への誘電率土壌水分計の適用可能性検討

劉 俊 榮¹⁾, 大 下 和 徹¹⁾, 高 岡 昌 輝¹⁾
藤 森 崇¹⁾, 日下部 武 敏¹⁾

¹⁾ 京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻
(〒 615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C-1-3 E-Mail: oshita.kazuyuki.6e@kyoto-u.ac.jp)

概 要

下水汚泥は高含水で、乾燥や焼却等の処理を行う場合、補助燃料を用いることが多い。汚泥含水率のリアルタイム計測は、補助燃料使用量やシステムの最適化を可能にする。本研究では、簡便な誘電率土壌水分計を用いた脱水・乾燥汚泥含水率のリアルタイム計測への適用可能性を検討した。結果、複数の汚泥含水率を推定するための一つの統一式を作成できた。説明変数は土壌水分計出力値の3次式が望ましく、決定係数は0.890、本式の含水率測定誤差は6.301%であった。また、汚泥ごとの校正式を作成することで、測定誤差を1.716%まで改善することができた。

キーワード：脱水汚泥、乾燥汚泥、含水率、土壌水分計、リアルタイム計測

原稿受付 2020.6.17 原稿受理 2020.9.14

EICA: 25(2・3) 45-58

1. はじめに

日本における下水汚泥の2018年度の年間発生量は241万t-DS¹⁾で、最も排出量の多い産業廃棄物の一つであるが、下水汚泥はバイオマスとして位置づけられるため、そのエネルギー利用が注目されている。一方で、下水汚泥は含水率が高いため、日本で多く採用されている焼却等の熱処理のほか、炭化などによる固形燃料化等を行う場合、補助燃料として化石燃料を投入することが一般的である。化石燃料由来のCO₂は温室効果ガスとしてカウントされるため、この量を可能な限り減少させること、あるいはその投入量を制御し最適化することは、温室効果ガス排出の削減に繋がる。このようなことを実現させるためには、例えば、焼却などで発生する廃熱を用いて、あらかじめ下水汚泥を乾燥させるプロセスが重要となる。更に、乾燥時における含水率の経時変化や、焼却等に供給される乾燥汚泥の含水率、あるいは乾燥プロセスを有さずとも脱水汚泥の含水率をリアルタイムで把握できれば、後半の熱処理工程において、補助燃料供給や運転の効率的な制御が可能になる。

現状では、焼却炉内の温度をみて、これらの制御を行っているが、炉内へ脱水・乾燥汚泥を供給する前に汚泥の含水率をリアルタイムでかつ連続的に計測することが可能となれば、より効率的な制御システムの構築が期待できる。また、リアルタイム計測結果を前のプロセスにフィードバックする観点からは、脱水機の運転や凝集剤添加のコントロール、乾燥機の運転にも有用となる。

汚泥含水率のリアルタイム計測に関しては、既にマイクロ波を用いた技術が実用化されているが²⁻⁴⁾、脱水汚泥の含水率：70-80%w.b.程度までが適用範囲とされており、含水率が低い乾燥汚泥への適用は困難である。

ところで、土壌学の分野では様々な誘電率法にもとづいた土壌水分計がフィールド調査で使用されている。土壌水分計は、水の比誘電率が鉱物等の比誘電率に比べて非常に高い⁵⁾ことを利用した水分計であり、簡便な手法として良く用いられている。一般的に、土壌の含水率は脱水汚泥の含水率より低い範囲にあり⁶⁾、土壌水分計は低含水率範囲における計測にも適用できると思われる。

土壌水分計は、測定対象となる試料の誘電率に比例して電圧[mV]が出力される。しかしながら、それぞれの試料において出力電圧は、有機分率などの試料の性状やかさ密度などの物性に影響されるため、試料の水分量がメーカーの提供する校正式(キャリブレーション式)と一致しないケースが多い。そのため、正確な計測のためには測定対象となる試料に特化したキャリブレーション式を作成することが望ましい。そこで、本研究では土壌水分計を使用し、脱水汚泥、および乾燥汚泥の含水率をリアルタイムで計測することを試みた。具体的には、静的な状態での水分計の測定範囲や、温度の影響を確認し、実汚泥試料を用いキャリブレーション式を作成した。最終的には、作成したキャリブレーション式の脱水・乾燥汚泥の含水率計測への適用性を評価した。

2. 方 法

2.1 汚泥試料の採取および性状分析

(1) 調査対象とした下水汚泥について

本研究では、脱水汚泥に加えて、既存の方式では含水率のリアルタイム計測が困難であった含水率の低い乾燥汚泥を、土壌水分計を用いた含水率計測の対象とした。対象とした試料を採取した下水処理場は、下水道統計⁷⁾を参考にし、下水の排除方式（合流式、分流式）、汚泥の消化の有無、調質方法（1液薬注：高分子凝集剤、2液薬注：高分子凝集剤+ポリ硫酸第二鉄）および脱水機種（スクリュープレス、ベルトプレス、遠心分離およびロータリープレス）の組み合わせを、網羅的に調査できるように考慮して決定した。また、乾燥汚泥試料を複数入手することが困難であったが、脱水汚泥試料の含水率を調整し、低含水率範囲における土壌水分計の挙動を確認した。

調査対象とした汚泥試料は、Table 1 に示すように、8処理場の9種類である。

(2) 汚泥試料の性状分析

汚泥試料は採取した後、冷蔵庫にて4℃以下で冷暗保存し、速やかに性状分析を行った。分析項目は、Table 2 に詳細を示すように、含水率、強熱減量、元

Table 1 Outline of the Investigated Waste Water Treatment Plants (WWTP)

| 下水処理場 | 下水排除方式 | 調質方法 | 消化有無 | 脱水機 | 試料 |
|-------|---------------|------|-------|----------|--------------|
| A 処理場 | 分流式 | 1液薬注 | 消化汚泥 | ベルトプレス | 脱水汚泥 |
| B 処理場 | 合流式 (一部分流) | 1液薬注 | 消化汚泥 | スクリュープレス | 脱水汚泥 乾燥汚泥 |
| C 処理場 | 分流式 | 1液薬注 | 消化汚泥 | 遠心分離 | 脱水汚泥 |
| D 処理場 | 分流式 (一部合流) | 1液薬注 | 消化汚泥 | ベルトプレス | 脱水汚泥 |
| E 処理場 | 合流式 (一部分流) | 1液薬注 | 混合生汚泥 | 遠心分離 | 脱水汚泥 |
| F 処理場 | 分流式 | 2液薬注 | 混合生汚泥 | ベルトプレス | 脱水汚泥 |
| G 処理場 | 分流式 | 1液薬注 | 混合生汚泥 | 遠心分離 | 脱水汚泥 |
| H 処理場 | 分流式 | 1液薬注 | 混合生汚泥 | ロータリープレス | 脱水汚泥 |

Table 2 Characterization of Sewage Sludge Samples

| 分析項目 | 分析方法 |
|---------------------|---|
| 含水率 [M: %w. b.] | 下水試験方法 ⁸⁾ 第5編 汚泥・ガス試験, 第1章 一般汚泥試験, 第6節 蒸発残留物及び含水率 (固形物及び水分) |
| 強熱減量 [VTS: %-DS] | 下水試験方法 ⁸⁾ 第5編 汚泥・ガス試験, 第1章 一般汚泥試験, 第8節 強熱減量 |
| 元素組成 [%-DS] | (1) JIS M 8819 石炭類及びコークス類—機器分析装置による元素分析方法 ⁹⁾ CHN 自動分析装置 株式会社ジェイ・サイエンス・ラボ製: MICRO CORDER JM10 (2) ファンダメンタルパラメータ法 波長分散型蛍光 X 線分析装置 (XRF) 島津製作所製: XRF-1800 |

素組成の分析を行った。以上の分析については、各試料につき3回測定を行い、平均値を求めた。

含水率[M: %w. b.]、強熱減量[VTS: %-DS] は下水試験方法⁸⁾に従い分析した。試料の固形分中の元素組成[%-DS] は、JIS M 8819 石炭類及びコークス類—機器分析装置による元素分析方法⁹⁾に従い、完全に乾燥した試料について CHN 自動分析装置 (株式会社ジェイ・サイエンス・ラボ製: MICRO CORDER JM10) および波長分散型蛍光 X 線分析装置 (島津製作所製: XRF-1800) を用いて測定した。また、O [%-DS] の含有割合は式(1)によって求めた。式(1)中の Sc は、蛍光 X 線分析により求めた T-S (全硫黄) を先行研究から求めた係数: 0.66 をかけて算出したものである¹⁰⁾。

$$O = VTS - C - H - N - Sc \quad (1)$$

ただし、

$$\begin{aligned} VTS &= \text{強熱減量} \quad [\text{\%-DS}] \\ C &= \text{炭素の含有割合} \quad [\text{\%-DS}] \\ H &= \text{水素の含有割合} \quad [\text{\%-DS}] \\ N &= \text{窒素の含有割合} \quad [\text{\%-DS}] \\ Sc &= \text{可燃性硫黄の含有割合} \quad [\text{\%-DS}] \end{aligned}$$

2.2 誘電率法土壌水分計

物質の比誘電率は、物質によって固有の値を持つ。水の比誘電率が80(20℃)である反面、空気が1、氷が3(-5℃)、花崗岩が8、砂岩が10、玄武岩が12のように、水の比誘電率は、鉱物等の比誘電率に比べて非常に高い。したがって、誘電率測定法は、含水量が増加すると誘電率が大幅に増加することを利用したものである。従って、誘電率(ϵ)と含水率(θ)の関係(キャリブレーション曲線)を把握、作成することができれば、任意の試料について、誘電率を測定することで、容易に含水率を推定することが可能となる⁵⁾。

誘電率法土壌水分計による水分の測定値は、温度と塩分濃度などによる電気伝導度に影響されるが¹¹⁾、測定周波数が高いとその影響度が小さくなることが報告されている¹²⁾。METER GROUP, Inc. (旧名: Decagon Devices Inc.) の従来の水分計である EC-10 Soil Moisture Sensor, EC-20 Soil Moisture Sensor は測定周波数が5 MHz であるが、これらよりも高い周波数70 MHz の信号を利用した新型の EC-5 Soil Moisture Sensor が開発され、それらの影響を低減できるようになった¹³⁾。本研究では、この EC-5 Soil Moisture Sensor を使用した。

EC-5 Soil Moisture Sensor は、水分計周辺に測定可能範囲内にある測定対象となる試料の誘電率を、FDR (Frequency Domain Reflectometry, 周波数領域反射率測定) 法に基づいて電圧[mV] に換算、出力

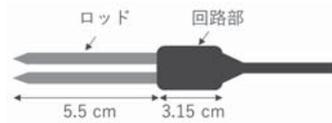


Fig. 1 Size of EC-5 Soil Moisture Sensor (Left), Picture of EC-5 Soil Moisture Sensor, Em5b Data Logger (Right)

する^{14,15)}。しかし、対象試料により、出力電圧に対応する含水率がメーカーの提供するキャリブレーション式と必ずしも一致しないため、定量性に問題があるとされている^{16,17)}。したがって、本研究で対象とする下水汚泥について広い含水率の範囲で、EC-5 Soil Moisture Sensorを使用したキャリブレーション式を作成することが望ましい¹⁸⁾。計測データの処理には、同社のEm5b Data Loggerを使用した。Fig. 1にEC-5 Soil Moisture Sensorの寸法と写真、Em5b Data Loggerの写真を示す。

(1) EC-5 Soil Moisture Sensorの個体差確認

本研究においては、汚泥試料の含水率計測に、複数本のEC-5 Soil Moisture Sensorを使用した。そのため、それぞれの水分計に個体差が十分小さいかを確認する必要がある¹⁹⁾。空気、グリセリン、水道水、蒸留水の4種類の媒体を用いて、土壤水分計の出力値を確認した。個体差確認には、4本の土壤水分計を使用した。空気や水道水などの流体は分布が均一であり、脱水汚泥などの充填の不均一によるばらつきを回避することができ、個体差確認には最適である。250 mLのポリ瓶に各媒体を充填させ、ロッドの損傷に注意しながら水分計を挿入し、5分間測定し、出力値の平均を求めた。

(2) EC-5 Soil Moisture Sensorの測定範囲確認

本研究では、水道水とA, C, H処理場の脱水汚泥試料を用い、測定範囲の確認を行った。

まず、EC-5 Soil Moisture Sensorの先端が100 mLのメスシリンダーの底に接するように設置し、水道水を1 mL (高さ0.3 cm) ずつ、45 mL (高さ13.5 cm) まで入れ、測定した。これにより測定可能高さの上端値を見積もった。次に、100 mLのメスシリンダーの底から4.5 cmの位置にEC-5 Soil Moisture Sensorの先端を設置し、水道水を1 mL (高さ0.3 cm) ずつ、45 mL (高さ13.5 cm) まで投入し、測定可能高さの下端値を見積もった。測定可能幅は、以下の方法によって確認した。内径2.4 cmの容量100 mLのメスシリンダー、および内径各3.0, 4.0, 5.5, 6.0, 8.0, 8.5 cm

のポリ瓶に、水道水がすべて高さ5.5 cmになるように投入し、EC-5 Soil Moisture Sensorの先端が各容器の底に接するように設置し、測定した。

また、A, C, H処理場の脱水汚泥試料を用い、EC-5 Soil Moisture Sensorの測定範囲の確認を行った。まず、測定可能高さを、以下の2通りの方法によって確認した。最初に、EC-5 Soil Moisture Sensorの先端が100 mLメスシリンダーの底に接するように設置し、高さ1.5 cmずつ、高さ13.5 cm (A処理場の汚泥は9 cm) まで脱水汚泥を投入し、測定可能高さの上端値を見積もった。次に、メスシリンダーの底から4.5 cmの位置にEC-5 Soil Moisture Sensorの先端を設置し、高さ1.5 cmずつ、高さ13.5 cm (A処理場の汚泥は7.5 cm) まで脱水汚泥を投入し、測定可能高さの下端値を見積もった。測定可能幅は、以下の方法によって確認した。内径2.4 cmの容量100 mLのメスシリンダー、および内径各3.0, 4.0, 5.5, 6.0, 8.0, 8.5 cmのポリ瓶 (A処理場の汚泥はポリ瓶のみ) に、脱水汚泥を高さ5.5 cmになるように投入し、EC-5 Soil Moisture Sensorの先端が各容器の底に接するように設置し、測定可能幅を見積もった。これらの確認では、汚泥を容器に投入する際、汚泥充填率が均一になるように注意した。

(3) EC-5 Soil Moisture Sensorの温度依存性確認

水の比誘電率は、常に一定でなく、温度に反比例することが知られている²⁰⁾。そのため、土壤水分計を使用した含水率の推定には、温度が影響すると思われる¹²⁾。そこで、EC-5 Soil Moisture Sensorの温度依存性を、H処理場の脱水汚泥試料を用いて確認した。500 mLのポリ瓶に脱水汚泥試料を約350 g投入し、EC-5 Soil Moisture SensorとRT-1 Soil Temperature Sensor (METER GROUP Inc.) を結束バンドで結び、ポリ瓶の中央に配置した。加温中の含水率変動を抑え、水道水の混入を防ぐため、アルミホイルでポリ瓶に蓋をした。恒温振とう水槽T-N22S (トーマス科学機器株式会社) に10℃の水道水を満たし、ポリ瓶を水槽に入れ、加温温度を80℃と設定した。この時、実際

の汚泥試料の温度は、10℃から71℃までであった。
温度依存性は、以下の式(2)によって求めた²¹⁾。

$$TS = \frac{\Delta mV}{mV_{mean} \times \Delta T} \times 100 \quad (2)$$

ただし、

- TS = 土壌水分計の温度感度 [%、mV℃⁻¹]
 ΔmV = 温度偏差による土壌水分計の出力値の変化。
 出力値の最大値-最小値
 mV_{mean} = 土壌水分計の出力値の中央値
 ΔT = 温度変化。最高温度-最低温度

(4) EC-5 Soil Moisture Sensor のキャリブレーションおよび含水率推定

汚泥含水率と水分計出力電圧の関係を確認するため、下水汚泥を用いてキャリブレーション式の作成、および含水率の計測を行った。本研究においては、15~25℃の常温と、50~70℃の高温の2つの温度条件において実験を行った。常温におけるキャリブレーションおよび計測には、A処理場の脱水汚泥とB処理場の脱水汚泥、乾燥汚泥の2処理場3種の汚泥を用いた。高温におけるキャリブレーションおよび計測には、C、D、E、F、G、H処理場の脱水汚泥の6処理場6種の汚泥を用いた。汚泥の温度は、RT-1 Soil Temperature Sensor を使用し測定を行った。

常温条件におけるキャリブレーションにはA、B処理場の脱水汚泥試料を用いた。脱水汚泥試料は、含水率を調整せずそのまま、もしくは105℃で乾燥し、水道水を加え含水率を調整後、250 mLのポリ瓶に約150 g投入した。試料数は、汚泥試料量の制約により後述する乾燥汚泥を合わせ10~20であり、これらの含水率は45 %w.b.~83 %w.b.であった。EC-5 Soil Moisture Sensor の先端がポリ瓶の中央部に位置するように設置し、測定した。B処理場の乾燥汚泥も、含水率を調整せずそのまま、もしくは105℃で乾燥し、水道水を加え含水率を調整後、250 mLのポリ瓶に約160 g投入した。試料として用いた汚泥の含水率は12.5 %w.b.~50 %w.b.であった。EC-5 Soil Moisture Sensor の先端がポリ瓶の中央部に位置するように設置し、測定を行った。ポリ瓶に採取した汚泥の質量を電子天秤で秤量し、ポリ瓶の体積で割った値をかさ密度として求めた。

高温条件におけるキャリブレーションに用いたC、D、E、F、G、H処理場の脱水汚泥を、卓上型ニーダーPNV-5H(株式会社入江商会製)を使用し乾燥した。本ニーダーは、パドルが付いており、試料を攪拌しながら、もしくは攪拌せずシリコンオイルを熱媒体として、伝熱面を介し対象の汚泥を間接的に加熱乾燥することができる。卓上型ニーダーの温度を130℃、回転数を66 rpmで攪拌しながら脱水汚泥を乾燥した。脱

水汚泥試料を、含水率を調整せずそのまま、もしくはニーダーで乾燥し、約20分間隔で攪拌を止め、340 mLのプラスチックビーカーに約240 g汚泥試料を採取した。ニーダーは、試料採取後すぐ攪拌を再開した。試料として用いた汚泥の含水率は5 %w.b.~85 %w.b.であった。EC-5 Soil Moisture Sensor とRT-1 Soil Temperature Sensor の先端がビーカーの中央部に位置するように設置し、測定を行った。ビーカーに汚泥を採取した際に、質量を電子天秤で秤量し、ビーカーの体積で割った値をリアルタイム計測でのかさ密度とした。

常温条件と高温条件におけるEC-5 Soil Moisture Sensor の挙動の違いを把握するため、G、H処理場の汚泥試料を用いて常温条件と高温条件の2条件におけるキャリブレーションを行った。含水率を調整せずそのまま、もしくは14 %w.b.~84 %w.b.になるように調節後、340 mLのプラスチックビーカーに約240 g汚泥試料を採取した。脱水汚泥試料の乾燥には、卓上型ニーダーPNV-5Hを使用し、温度を130℃、回転数66 rpmで攪拌しながら脱水汚泥を乾燥した。採取した試料を、常温条件でのキャリブレーションを行う際には、15~25℃になるよう、温度を調整し、計測した。高温条件でのキャリブレーションを行う際には、採取した試料をそのまま用いた。汚泥試料の温度は、50~70℃であった。EC-5 Soil Moisture Sensor とRT-1 Soil Temperature Sensor の先端がビーカーの中央部に位置するように設置し、測定を行った。

キャリブレーションに用いた汚泥の含水率を、下水試験方法 上巻 第2編 第4章 第6-9節による方法によって測定した⁸⁾。

2.3 マイクロ波式水分計とEC-5 Soil Moisture Sensor の比較

マイクロ波式水分計は、マイクロ波の伝播速度が物質によって異なる点を利用した水分計である。含水率100 %w.b.の水を透過したマイクロ波の位相遅れと、測定対象物質を透過したマイクロ波の位相遅れの差を求めることで、測定対象物質の含水率を測定する。マイクロ波式水分計は、マイクロ波式濃度計とも呼ばれ、混合生汚泥や濃縮汚泥などの濃度を比較的正確に計測することができる。しかし、含水率70 %w.b.以下には適用が困難である²⁾。その反面、EC-5 Soil Moisture Sensor のメーカーであるMETER GROUP Inc.²²⁾によると、EC-5 Soil Moisture Sensor は、理論上含水率0 %w.b.から100 %w.b.まで適用が可能であり、幅広い含水率範囲においての適用事例が報告されている^{15,19)}。

そこで、本研究では、合流式(一部分流)下水排除方式を採用した下水処理場の混合生汚泥の含水率をマ

マイクロ波式の含水率計で推定した先行研究²³⁾の結果と、本研究で用いた EC-5 Soil Moisture Sensor の決定係数や平均測定誤差を比較することで、EC-5 Soil Moisture Sensor の下水汚泥への適用可能性を検討した。

3. 結果と考察

3.1 下水汚泥試料の性状

8 処理場の 9 種類 (脱水汚泥 8 種, 乾燥汚泥 1 種) の試料の性状分析結果の詳細を **Table 3** に示す。含水率は、脱水汚泥において 74.09~88.07 %w.b., 乾燥汚泥において 45.83 %w.b. であり、強熱減量は 76.59~91.56%-DS の範囲であった。日本全国 32 種の汚泥性状を調査した Mahzoun *et al.*²⁴⁾ の結果と比較すると、含水率について、全国平均値±標本標準偏差は、79.82±3.42 %w.b. であったのに対して、C, D, G 処理場の汚泥試料の含水率はこれらの範囲を上回っており、F, H 処理場の汚泥試料の含水率はこれらの範囲を下回っていた。したがって脱水汚泥の含水率については少し広い範囲の汚泥を対象としていることになる。

強熱減量については、全国平均値±標本標準偏差は 79.94±6.75%-DS であったが²⁴⁾、F, H 処理場の汚泥試料の強熱減量はこれらの範囲を上回っており、強熱減量についても、含水率と同様のことが言える。C, O, H, N, Si, Al, P, Ca, S, Fe, Mg, K の元素組成は、本研究での調査結果は、全国平均値±標本標準偏差²⁴⁾の範囲に概ね入っていた。

以上の結果より、本研究にて使用した汚泥試料は、消化・混合生汚泥、合流・分流式の汚泥としてそれぞれの特性を有しつつも、日本全国の標準的な組成を持っている汚泥と言える。

B 処理場の脱水汚泥と乾燥汚泥において、含水率以外の性状変化がほとんどなかったが、B 処理場の場合、乾燥方式として蒸気による間接加熱型乾燥を採用しており、乾燥温度が高くないため、強熱減量に変化がほ

とんどないと考えられる。

3.2 土壌水分計の性能評価

(1) EC-5 Soil Moisture Sensor の個体差確認

4 本の水分計の個体差を把握するため、空気、グリセリン、水道水、蒸留水の 4 種類の媒体を用いて、土壌水分計の出力値を確認した。実験結果を **Fig. 2** に示す。

空気の比誘電率は 1、28℃でのグリセリンの比誘電率は 42.1、20℃の水の比誘電率は 80 である²⁵⁾。測定結果より、各測定対象の比誘電率に比例する出力値となったが、各個体において、4 本の変動係数は空気では 5.76%、グリセリンでは 5.11%、水道水では 0.51%、蒸留水では 1.43% であった。空気とグリセリンの変動係数が大きい原因としては、空気の場合、空気中の僅かな湿気に反応したこと、グリセリンの場合、粘度が高く、水分計の周りに気泡が付着しやすかったことが考えられる¹⁹⁾。

ばらつきの平均が 3.20% で、このような個体差は空気、風乾砂 (体積含水率: 0.02 m³m⁻³)、飽和砂 (体積含水率: 0.41 m³m⁻³)、水の 4 種類の媒体を用いて EC-5 Soil Moisture Sensor の個体差を確認した三石ら²⁶⁾の結果での変動係数 3% 程度とほぼ同等である。なお、空気においてのセンサーのばらつきが一番大き



Fig. 2 Results of Individual Difference Confirmation Using Each Medium

Table 3 Properties and Chemical Composition of Sewage Sludge Samples

| 試料 | 含水率 [%w. b.] | 強熱減量 [%-DS] | 元素組成 [%-DS] | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|-------------|-------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | | | C | O | H | N | Si | Al | P | Ca | T-S | Fe | Mg | K | Na |
| A 処理場 | 82.24 | 84.37 | 38.30 | 31.89 | 6.39 | 6.91 | 2.13 | 0.98 | 3.59 | 1.86 | 1.33 | 0.68 | 1.03 | 0.69 | N. D. |
| B 処理場 (脱水汚泥) | 78.7 | 79.54 | 39.31 | 29.17 | 5.87 | 4.56 | 3.19 | 2.2 | 1.93 | 0.87 | 0.95 | 1.07 | 0.34 | 0.42 | 0.11 |
| B 処理場 (乾燥汚泥) | 45.83 | 78.47 | 40.03 | 26.69 | 6.35 | 4.78 | 3.15 | 2.12 | 1.88 | 0.84 | 0.94 | 1.02 | 0.34 | 0.40 | 0.12 |
| C 処理場 | 88.07 | 76.59 | 43.02 | 18.72 | 7.03 | 7.04 | 1.77 | 1.54 | 2.85 | 1.39 | 1.18 | 1.27 | 0.58 | 0.26 | N. D. |
| D 処理場 | 85.95 | 76.91 | 42.05 | 20.19 | 6.53 | 6.83 | 2.40 | 0.97 | 2.01 | 1.39 | 2.00 | 2.75 | 0.36 | 0.22 | N. D. |
| E 処理場 | 80.17 | 85.77 | 45.14 | 28.06 | 7.01 | 5.05 | 1.68 | 0.89 | 1.52 | 1.23 | 0.79 | 0.61 | 0.36 | 0.30 | N. D. |
| F 処理場 | 74.09 | 91.56 | 38.42 | 42.41 | 5.93 | 4.16 | 1.12 | 0.45 | 2.11 | 1.07 | 0.97 | 1.24 | 0.41 | 0.31 | N. D. |
| G 処理場 | 84.18 | 84.34 | 45.83 | 23.30 | 7.15 | 7.27 | 0.94 | 0.73 | 2.17 | 1.03 | 1.20 | 1.23 | 0.67 | 0.54 | 0.36 |
| H 処理場 | 75.46 | 87.74 | 47.56 | 27.28 | 7.16 | 5.33 | 1.47 | 0.49 | 1.18 | 0.74 | 0.61 | 0.41 | 0.30 | 0.18 | N. D. |

N. D. : Not Detected

く、また、空気、ガラスビーズ、グリセリン、メタノール、水を媒体として用い、土壌水分計 (Theta Probe) の個体差を確認した先行研究では、グリセリンにおいてセンサーのばらつきが一番大きかった¹⁹⁾。したがって、空気とグリセリンの場合での出力値のばらつきは、土壌水分計の個体差でなく、充填の不均一性から由来することであると考えられ、本実験で用いた土壌水分計において、個体差は無視できると考えられる。

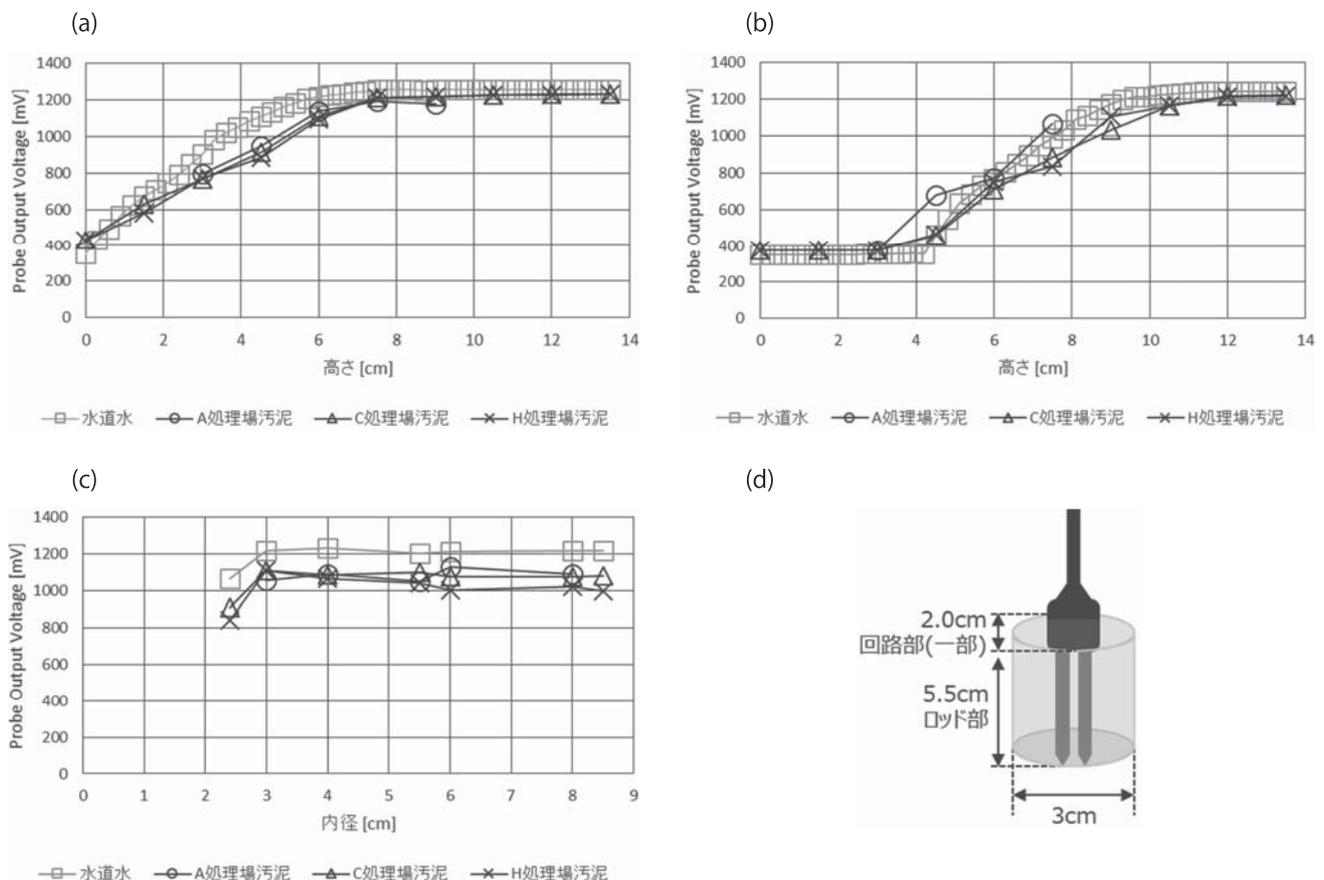
(2) EC-5 Soil Moisture Sensor の測定範囲確認

EC-5 Soil Moisture Sensor の先端が 100 mL のメスシリンダーの底に接するように設置し、測定可能高さ (上端) の確認結果を **Fig. 3a** に示す。水道水を 1 mL (高さ 0.3 cm) ずつ投入した場合では、水位が 7.2 cm の時点での出力値が 1248 mV であったことに対し、水位が 7.5 cm となった時点で 1254 mV の出力値を示し、それ以降では出力値の変動が安定し、13.5 cm 時点では 1256 mV と、あまり変化が観察されていない。高さ 1.5 cm ずつ脱水汚泥を投入した場合では、A 処理場の汚泥の場合には高さ 7.5 cm の時点で 1195 mV でピークを示した。C 処理場の汚泥の場合には高さ 6 cm の時点での出力値が 1111 mV であったことに対し、高さ 7.5 cm の時点で 1214 mV と、それ以後では出力

値の変動が安定し、13.5 cm 時点では 1233 mV と、あまり変化が観察されていない。H 処理場の汚泥の場合には高さ 6 cm の時点での出力値が 1094 mV であったことに対し、高さ 7.5 cm の時点で 1213 mV と、それ以後では出力値の変動が安定し、13.5 cm 時点では 1231 mV と、あまり変化が観察されていない。

したがって、正しい計測のためには、少なくともロッドの先端から長さ 7.5 cm 以上は測定対象物質で満たされている必要があると推察される。**Fig. 1** で示したように、EC-5 Soil Moisture Sensor のロッド長は 5.5 cm であるため、ロッド部だけでなく回路部の一部も測定対象物質で満たされている必要がある。

EC-5 Soil Moisture Sensor の先端をメスシリンダーの底から 4.5 cm の位置に設置し、測定可能高さ (下端) の確認結果を **Fig. 3b** に示す。水道水を 1 mL (高さ 0.3 cm) ずつ投入した場合では、4.2 cm から 4.5 cm の間で出力値が急激に増加したことが確認できた。脱水汚泥を高さ 1.5 cm ずつ投入した場合では、高さ 3 cm まででは、水分計と脱水汚泥が接触しておらず、前項の (1) EC-5 Soil Moisture Sensor の個体差確認にて測定した空気の出出力値は 368 ± 18.3 mV であることから、高さ 4.5 cm の時点で脱水汚泥中水分の検出が開始されていると考えられる。また、水道水



(a : Confirmation of Measurable Height (Top) with Sensor Tip Place at 0 cm Height, b : Confirmation of Measurable Height (Bottom) with Sensor Tip Place at 4.5 cm Height, c : Confirmation of Measurable Weigh, d : Minimum Required Area of EC-5 Soil Moisture Sensor)

Fig. 3 Confirmation of Measurable Area of EC-5 Soil Moisture Sensor Using Tap Water, and Dewatered Sewage Sludge Samples

を用いた実験結果から、3 cm~4.5 cmの間では水分の検出が行われていないと考えられる。したがって、正しい測定のため、土壤水分計の周辺が測定対象物質で満たされている必要はあるが、水分計の下端より下が測定対象物質で満たされている必要はないと推察される。

EC-5 Soil Moisture Sensor の測定可能幅の確認結果を **Fig. 3c** に示す。内径 2.4 cm の時点での出力値が 1066 mV であったことに対し、内径 4 cm の時点に出力値 1235 mV でピークを示しているが、それ以上の出力値はそれぞれ 5.5 cm で 1205 mV, 6 cm で 1213 mV, 8 cm で 1219 mV, 8.5 cm で 1220 mV と、内径 3 cm の出力値と約 1220 mV で概ね合致しているため、内径 3 cm の時点で既に測定範囲に達していると考えられる。A, C, H 処理場の脱水汚泥を用いた確認においても、水道水の場合と同じ傾向を示しているため、内径 3 cm の時点で既に測定範囲の限界に達していると考えられる。したがって、正しい計測のためには、少なくとも幅 3 cm 以上は測定対象物質で満たされている必要があると推察される。

以上の結果より、EC-5 Soil Moisture Sensor を使用して、測定試料の正確な出力値を得るためには、水分計周りに直径 3 cm, 高さ 7.5 cm 以上の円柱形空間が測定試料で満たされている必要があると考えられる。これは文献値¹⁸⁾と概ね整合する結果となった。**Fig. 3d** に EC-5 Soil Moisture Sensor の測定可能領域を示す。

(3) EC-5 Soil Moisture Sensor の温度依存性確認

10~71 °C までの H 処理場の脱水汚泥試料を用いて、各温度の EC-5 Soil Moisture Sensor の出力値を求め、温度が EC-5 Soil Moisture Sensor の出力値に与える影響を確認した結果を **Fig. 4** に示す。水分計の出力値は、温度に比例して、温度が高くなるにつれ水分計の出力値が上昇することが窺えた。この変化量は、式 (2) を用いると、0.145%°C⁻¹の変化に該当する。EC-5 Soil Moisture Sensor の温度依存性を調査した先行

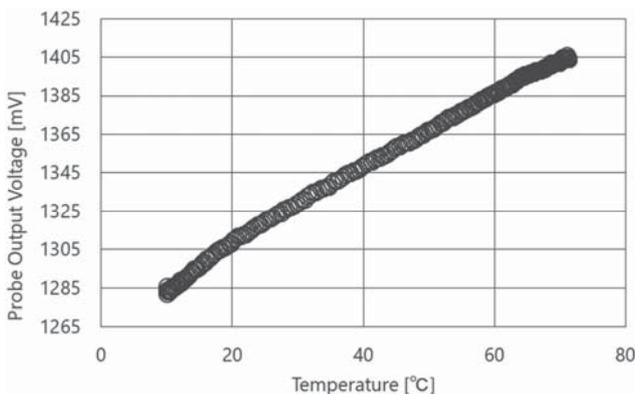


Fig. 4 Change in Probe Output Voltage of EC-5 Soil Moisture Sensor with Temperature

研究^{21,27)}では、含水率 35 %w.b., 55 %w.b.の家禽類糞を 4~24 °C に温度変化させた時、それぞれ 0.26%°C⁻¹, 0.37%°C⁻¹の出力値変化を示し、含水率 40 %w.b.の土壤を 9~46 °C に温度変化させた時、0.08%°C⁻¹の出力値変化を示した。本研究で調査した温度依存性は、土壤の場合よりはやや大きかったが、家禽類糞の場合よりは小さかった。しかし、本研究で用いた媒質は先行研究と異なるため、定量的比較には限界があると考えられる。

以上の結果より、EC-5 Soil Moisture Sensor の温度依存性は確認されたものの、その影響度は小さく、常温条件である 15~25 °C においては 1.45%, 高温条件である 50~70 °C においては 2.90% 測定誤差が生じる程度であり、各温度条件においては、実用上問題はないと考えられる。

(4) 下水汚泥を用いた土壤水分計のキャリブレーションおよび含水率推定

まず、下水汚泥を用いた土壤水分計のキャリブレーション式は、A 処理場~H 処理場すべての処理場の汚泥試料の含水率における、土壤水分計の出力値（電圧）やかさ密度との関係性を求めることで、汚泥の含水率を目的変数として、4 種類作成した。具体的には、土壤水分計の出力値と汚泥試料のかさ密度を説明変数とする 1 次式を式 (3) に、土壤水分計の出力値を説明変数とする 1 次式を式 (4) に、土壤水分計の出力値の 3 次式と汚泥試料のかさ密度の 1 次式を説明変数とする式を式 (5) に、土壤水分計の出力値の 3 次式を説明変数とする式を式 (6) に示す。1 次のキャリブレーション式は、線形で、シンプルである点が長所である。3 次のキャリブレーション式は、土壤水分計を使用し、含水率を計測した複数の先行研究^{19,28-30)}において、適用例があり、本研究においても作成を試みた。

$$M = 8.751 \times OP - 0.0483 \times \rho + 1.189 \quad (3)$$

(Adj. $R^2 = 0.852$, $p < 0.01$, 二乗平均平方根誤差 = 9.124%, 平均測定誤差 = 7.640%)

$$M = 6.890 \times OP - 15.583 \quad (4)$$

(Adj. $R^2 = 0.820$, $p < 0.01$, 二乗平均平方根誤差 = 10.033%, 平均測定誤差 = 8.434%)

$$M = 0.151 \times OP^3 - 5.049 \times OP^2 + 61.203 \times OP - 0.0322 \times \rho - 174.926 \quad (5)$$

(Adj. $R^2 = 0.903$, $p < 0.01$, 二乗平均平方根誤差 = 7.413%, 平均測定誤差 = 5.794%)

$$M = 0.133 \times OP^3 - 4.706 \times OP^2 + 58.568 \times OP - 186.731 \quad (6)$$

(Adj. $R^2 = 0.890$, $p < 0.01$, 二乗平均平方根誤差 = 7.873%, 平均測定誤差 = 6.301%)

ただし,

$$\begin{aligned} M &= \text{汚泥の含水率} [\%] \\ OP &= \text{センサーの出力値} [10^2 \text{mV}] \\ \rho &= \text{かさ密度} [\text{kg/m}^3] \\ \text{Adj. } R^2 &= \text{自由度調整済み決定係数} \end{aligned}$$

であり, また, 二乗平均平方根誤差 (RMSE) は土壌水分計による計測値とキャリブレーション式による推定値のずれの二乗和の平均値に平方根をとったもので, 平均測定誤差は土壌水分計による計測値とキャリブレーション式による推定値の絶対差の平均である。

まず, 1次式のキャリブレーション式である式(3), 式(4)より3次式のキャリブレーション式である式(5), 式(6)の方が Adj. R^2 値, 二乗平均平方根誤差, 平均測定誤差の3つの項目において共に優れる結果を示した。また, 3次式のキャリブレーション式において, 説明変数としてかさ密度を取り入れた式(5)とかさ密度を取り入れてない式(6)を比較すると, かさ密度ありの式(5)の方が Adj. R^2 値, 二乗平均平方根誤差, 平均測定誤差の3つの項目において共に優れる結果を示したが, それほど大きな差はなかった。Cobos³¹⁾によると, EC-5 Soil Moisture Sensor は, 鈹質土壌においては平均測定誤差が $\pm 3\%$, 培養土においては $\pm 5\%$ の値を示し, 土壌の有機分率が高くなると, 土壌水分計による測定誤差が大きくなると報告されている。また, Mendes *et al.*²¹⁾ によると, EC-5 Soil Moisture Sensor は, 家禽類の糞や肥料においては平均測定誤差が $\pm 7.1\%$ の値を示した。藤原ら³²⁾によると, 鶏糞の強熱減量は 88%-DS と, 本研究に用いた汚泥試料の強熱減量と大差ない。したがって, 土壌水分計を用いた下水汚泥の含水率計測の平均誤差は, 概ね $\pm 7\%$ 以内であると推定される。3次式のキャリブレーション式(5), 式(6)は説明変数としてのかさ密度の有無に関わらず, 平均測定誤差が7%に収まっていた。しかしながら, 乾燥中にある汚泥やコンベヤで運ばれている汚泥などのリアルタイム含水率計測においては, かさ密度を同時にリアルタイム測定することが困難である場合が多く, かさ密度を考慮せずとも含水率が計測できるとより簡便に計測が可能である。したがって, 本研究における土壌水分計を使用した汚泥の含水率計測には, 式(6)のような3次式かさ密度なしのキャリブレーション式を用いることにした。そこで, Fig. 5a i)~viii) に, 3次式かさ密度なしのキャリブレーション式を A~H 処理場の汚泥試料各々について作成した特化式を示し, Fig. 5a ix) に, 3次式かさ密度なしのキャリブレーション式を A 処理場~H 処理場のすべての汚泥試料について作成した統合式, すなわち式(6)を図示する。また, A~H 処理場の汚泥試料各々について下水試験方法にしたがって測定した汚泥の含水率と土壌水分計を使用

して計測した汚泥の含水率の相関図を Fig. 5b) に示す。Fig. 5b i)~viii) には, A 処理場~H 処理場の汚泥試料各々の計測結果に特化式を適用した結果を, Fig. 5b ix) には, A~H 処理場のすべての汚泥試料の計測結果に統合式を適用した結果を示す。A~H 処理場の汚泥試料において, 決定係数 Adj. R^2 値が 0.9 以上であり, 両手法にしたがって求めた含水率の間で, 非常に高い相関があることが確認された。A 処理場~H 処理場のすべての処理場の汚泥試料の含水率計測結果を統合したグラフ (Fig. 5b ix)) でも, Adj. R^2 値が 0.9763 と, 両手法にしたがって求めた含水率の間で, かなり強い相関があることが確認された。

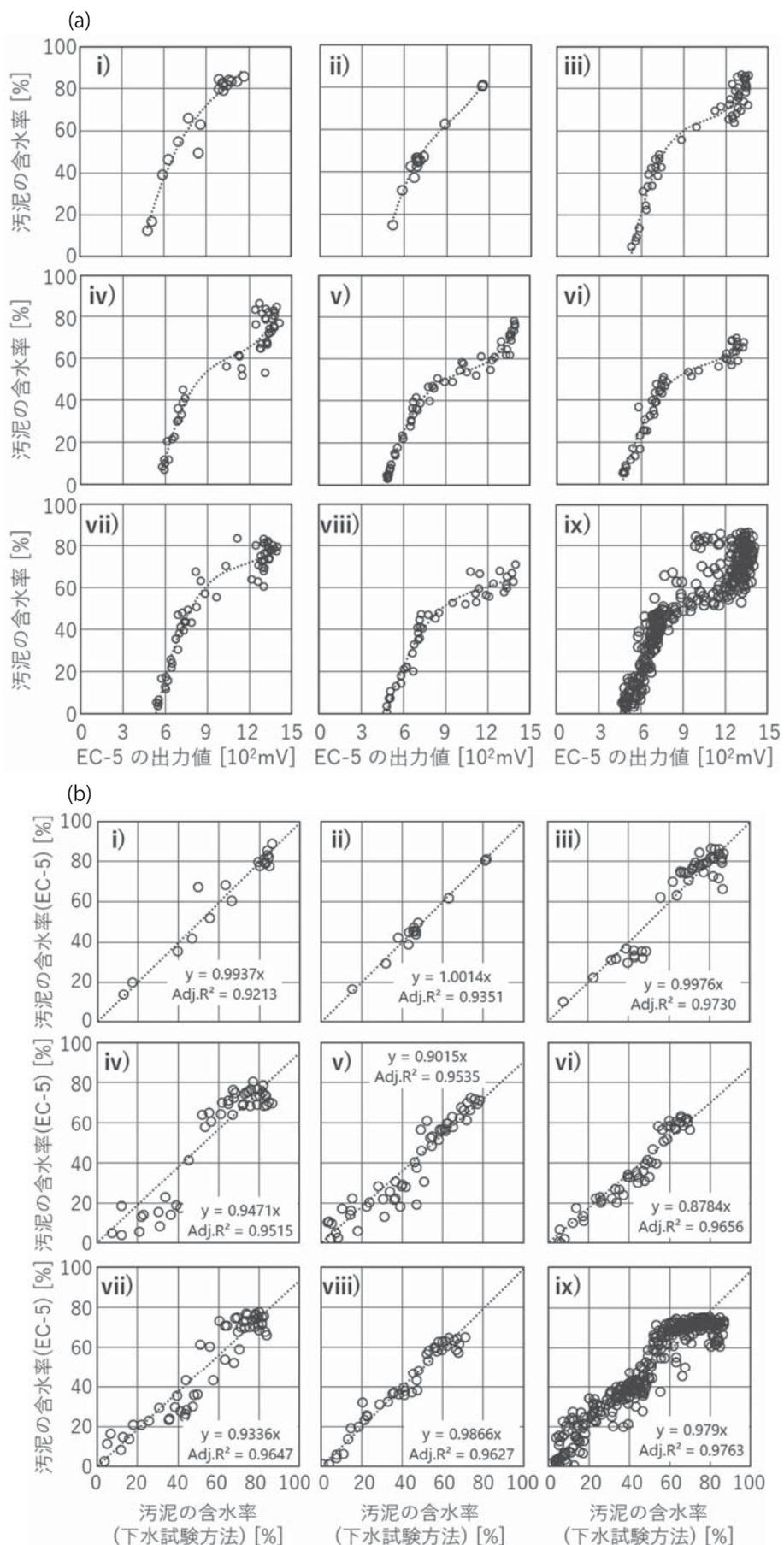
土壌水分計を使用した含水率推定への温度の影響は, 前項の 3.2(3) EC-5 Soil Moisture Sensor の温度依存性確認で示したように比較的小さいが, 本研究での計測において, 常温でのキャリブレーションと高温でのキャリブレーションの間で最大 55℃程の温度差があり, 式(2)を適用すると, 最大で 8.0%の違いに該当するため, 常温条件と高温条件において, 個別にキャリブレーション式を作成する方が望ましいと考えられる。そこで, G, H 処理場の汚泥を用いて 15~25℃の常温で作成したキャリブレーション式と, 50~70℃高温で作成したキャリブレーション式を個別で比較し, 温度による影響を確かめた。式(7)と Fig. 6a i) に G 処理場の汚泥試料を用いて作成した常温でのキャリブレーション式を, 式(8)と Fig. 6a ii) に G 処理場の汚泥試料を用いて作成した高温でのキャリブレーション式を, 式(9)と Fig. 6a iii) に G 処理場の汚泥試料を用いて作成した全温度 (常温+高温) でのキャリブレーション式を, 式(10)と Fig. 6a iv) に H 処理場の汚泥試料を用いて作成した常温でのキャリブレーション式を, 式(11)と Fig. 6a v) に H 処理場の汚泥試料を用いて作成した高温でのキャリブレーション式を, 式(12)と Fig. 6a vi) に H 処理場の汚泥試料を用いて作成した全温度 (常温+高温) でのキャリブレーション式を示す。また, G, H 処理場の汚泥試料について, 下水試験方法にしたがって測定した汚泥の含水率と土壌水分計を使用して計測した汚泥の含水率の相関図を Fig. 6b i)~vi) に示す。

$$M = 0.1685 \times OP^3 - 5.9914 \times OP^2 + 73.918 \times OP - 236.14 \quad (7)$$

$$(\text{Adj. } R^2 = 0.940, p < 0.01, \text{二乗平均平方根誤差} = 3.730\%, \text{平均測定誤差} = 3.212\%)$$

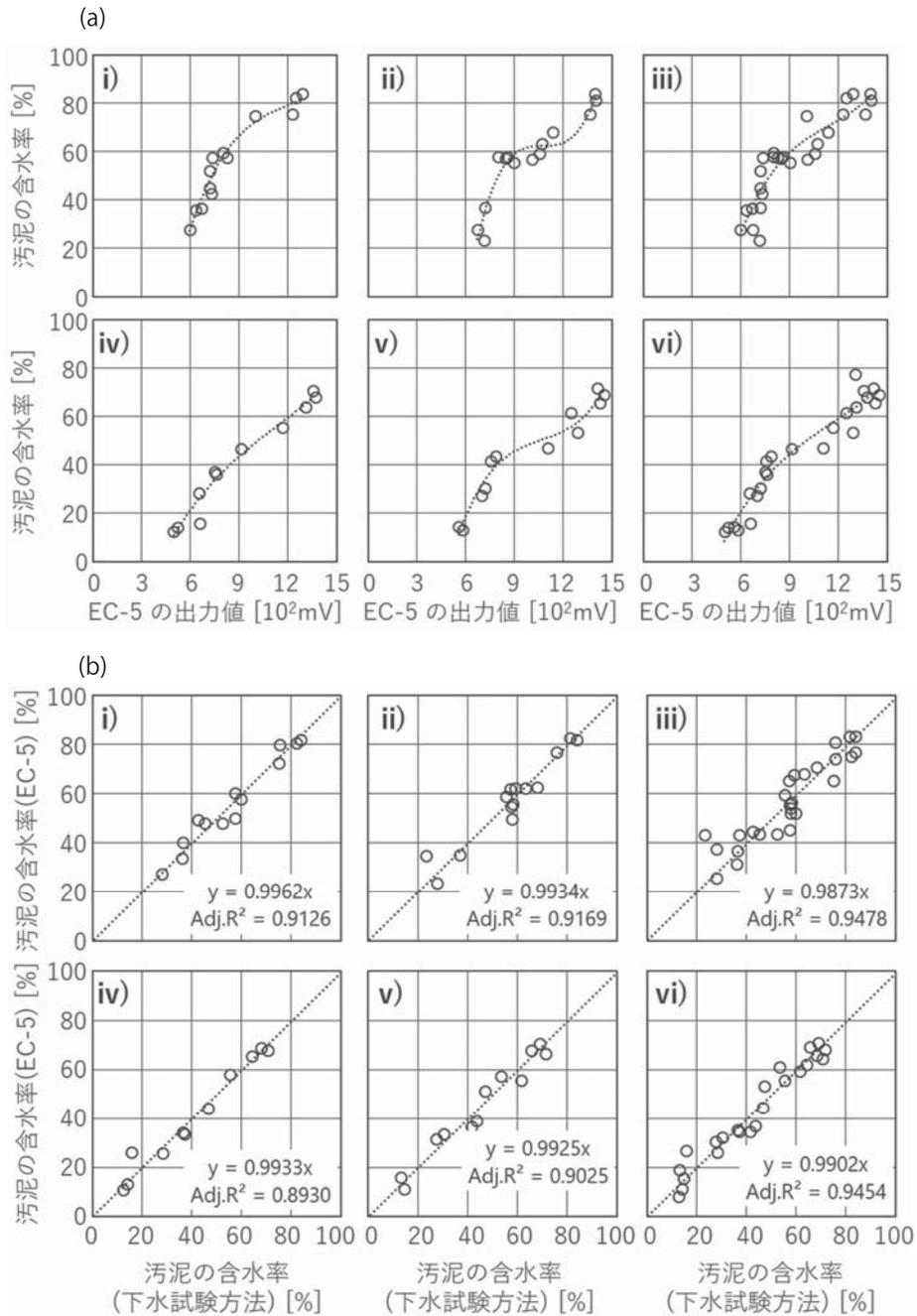
$$M = 0.5845 \times OP^3 - 18.837 \times OP^2 + 202.48 \times OP - 663.6 \quad (8)$$

$$(\text{Adj. } R^2 = 0.904, p < 0.01, \text{二乗平均平方根誤差} = 4.667\%, \text{平均測定誤差} = 3.869\%)$$



(a : Cubic Calibration Curves of EC-5 Soil Moisture Sensor with Sewage Sludge without Bulk Density, b : Correlation Graph of Sewage Sludge Water Content with Gravimetric Method Versus EC-5 Soil Moisture Sensor) (i) : WWTP A, ii) : WWTP B, iii) : WWTP C, iv) : WWTP D, v) : WWTP E, vi) : WWTP F, vii) : WWTP G, viii) : WWTP H, ix) : Sum of WWTP A to WWTP H)

Fig. 5 Calibration of EC-5 Soil Moisture Sensor with Dried·Dewatered Sludge



(a : Cubic Calibration Curves of EC-5 Soil Moisture Sensor with Sewage Sludge without Bulk Density, b : Correlation Graph of Sewage Sludge Water Content with Gravimetric Method Versus EC-5 Soil Moisture Sensor) (i) : WWTP G under Room Temperature (15~20 °C), ii) : WWTP G under High Temperature (50~70 °C), iii) : WWTP G under All Temperature, iv) : WWTP H under Room Temperature (15~20 °C), v) : WWTP H under High Temperature (50~70 °C), vi) : WWTP H under All Temperature)

Fig. 6 Calibration of EC-5 Soil Moisture Sensor with Dewatered Sludge

$$M = 0.1587 \times OP^3 - 5.4019 \times OP^2 + 65.028 \times OP - 203.64 \quad (9)$$

(Adj. $R^2 = 0.822$, $p < 0.01$, 二乗平均平方根誤差 = 6.925%, 平均測定誤差 = 5.509%)

$$M = 0.0468 \times OP^3 - 1.6091 \times OP^2 + 23.561 \times OP - 72.308 \quad (10)$$

(Adj. $R^2 = 0.952$, $p < 0.01$, 二乗平均平方根誤差 = 3.818%, 平均測定誤差 = 2.796%)

$$M = 0.2072 \times OP^3 - 6.6259 \times OP^2 + 72.881 \times OP - 224.72 \quad (11)$$

(Adj. $R^2 = 0.943$, $p < 0.01$, 二乗平均平方根誤差 = 3.945%, 平均測定誤差 = 3.796%)

$$M = 0.0906 \times OP^3 - 2.9976 \times OP^2 + 37.146 \times OP - 113.61 \quad (12)$$

(Adj. $R^2 = 0.942$, $p < 0.01$, 二乗平均平方根誤差 = 4.516%, 平均測定誤差 = 3.747%)

ただし、

- M = 汚泥の含水率 [%]
- OP = センサーの出力値 [$10^2 mV$]
- ρ = かさ密度 [kg/m^3]
- Adj. R^2 = 自由度調整済み決定係数

常温条件におけるキャリブレーション式である式(7)、式(10)において、Adj. R^2 値、二乗平均平方根誤差、平均測定誤差のすべての数値が高温条件におけるキャリブレーション式である式(8)、式(11)より優れる結果を示した。また、全温度条件におけるキャリブレーション式である式(9)、式(12)において、式(9)の R Adj.²値、二乗平均平方根誤差、平均測定誤差のすべての数値は、常温条件および高温条件の個別のキャリブレーション式である式(7)と式(8)の数値より劣っていて、式(12)においては、平均測定誤差が高温条件のキャリブレーション式である式(11)より優れていたが、常温条件のキャリブレーション式である式(10)よりは劣っていた。Adj. R^2 値、二乗平均平方根誤差については、式(10)と式(11)の数値より劣っていた。

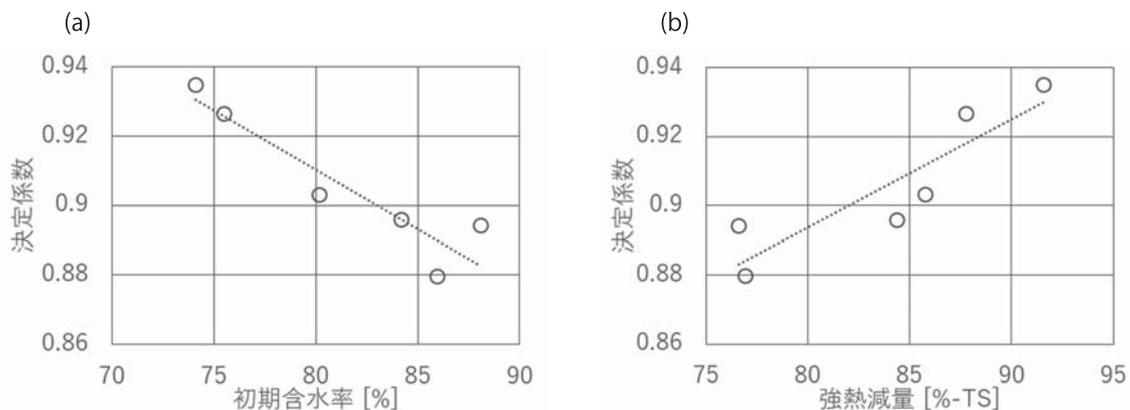
よって、各計測結果のキャリブレーション式への適合性は、常温での計測と、高温での計測を別々にする方がやや高くなることが分かった。また、高温において、二乗平均平方根誤差と平均測定誤差が大きくなることより、高温環境下では EC-5 Soil Moisture Sensor がばらつきやすくなることが示唆された。

EC-5 Soil Moisture Sensor を使用して汚泥の含水率を推定する際、汚泥試料の種類や温度条件に関係なく

一つのキャリブレーション式を作成することにより得られた平均測定誤差は 6.301% であり、先行研究²¹⁾の値とほぼ同等であったが、温度条件を統制し、汚泥試料に特化したキャリブレーション式を作成することにより、最大 1.716% (B 処理場の場合) まで改善することができた。A~H 処理場各々の汚泥試料について特化式を、全ての汚泥試料について統合式を適用した土壌水分計による含水率推定結果の平均測定誤差・決定係数を **Table 4** に示す。**Table 3** の汚泥性状分析結果と比較すると、高温条件下でキャリブレーション式を作成した C~H 処理場の汚泥試料の性状と決定係数の相関は、汚泥の初期含水率が高くなるほど、決定係数が低くなり ($p=0.0072$)、汚泥の強熱減量が高くなるほど、決定係数が高くなる ($p=0.0166$) ことが確認された。汚泥の初期含水率と決定係数との相関図を **Fig. 7a** に、汚泥の強熱減量と決定係数との相関図を **Fig. 7b** に示す。汚泥の初期含水率が高いと、土壌水分計による含水率推定範囲が広がるため、相関が悪くなると考えられる。先行研究^{21,31)}によると、測定対象物質の強熱減量が高くなると、平均測定誤差が大きくなることが知られており、本研究の結果と逆の傾向になっているが、含水率の影響が考慮されていない。**Table 3** の汚泥性状分析結果では、含水率が最も高い汚泥で強熱減量が最も低く、含水率が最も低い汚泥で強熱減量が最も高かった。したがって、測定におよぼす含水率の影響が強熱減量の影響より大きく、含水率が低くなると、強熱減量が高くなるにも関わらず、相関が良くなったと考えられた。

Table 4 Correlation Coefficient and Average Measurement Error of Measured Moisture Content of Sewage Sludge Using EC-5 Soil Moisture Sensor with Specialized Calibration Equations for Each WWTP and General Calibration Equation of All WWTPs

| 処理場 | A | B | C | D | E | F | G | H | 統 合 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 平均測定誤差 [%] | 3.807 | 1.716 | 4.266 | 5.344 | 2.113 | 3.078 | 4.345 | 3.426 | 6.301 |
| 決定係数 Adj. R^2 | 0.934 | 0.978 | 0.950 | 0.921 | 0.986 | 0.958 | 0.951 | 0.946 | 0.890 |



(a : Initial Water Content of Sludge Samples Versus Coefficient of Determination, b : Ignition Loss (VTS) of Sludge Samples Versus Coefficient of Determination)

Fig. 7 Correlation Graph of Properties of Sludge Samples Which Used for Establishing Calibration Equation on High Temperature Versus Coefficient of Determination

また、D 処理場の汚泥試料では平均測定誤差が 5.334% と、本研究で用いた汚泥試料の中で、一番誤差が高かった。Kargas *et al.*³³⁾ の報告によると、土壤中の鉄分は見かけの誘電率を上昇させ、土壌水分計を使用した含水率推定において含水率を過大評価させる作用をし、この働きは含水率が高いほど大きくなる。D 処理場の汚泥試料の Fe 濃度は 2.75%-DS で、本研究に用いた汚泥試料の平均より 2 倍以上高かった。したがって、D 処理場の汚泥試料の測定誤差が高かったことは Fe に起因する可能性がある。

以上の結果より、汚泥試料ごとの特化したキャリブレーション式を作成することにより、土壌水分計を用いた精度の高い計測が可能であることが分かった。ただし、鉄塩を下水処理や汚泥脱水の工程に用い、汚泥中の鉄濃度が高くなる場合は、測定誤差が大きくなる可能性が示唆された。

3.3 マイクロ波式水分計と EC-5 Soil Moisture Sensor の比較

マイクロ波周波数測定式の含水率計で混合生汚泥の含水率を推定した先行研究²³⁾において、下水試験方法⁸⁾にしたがって測定した汚泥の含水率とマイクロ波式水分計を使用して推定した汚泥の含水率の間の相関図を Fig. 8 に示す。含水率 74 %w.b.~84 %w.b. の汚泥試料について、下水試験方法にしたがって測定した汚泥の含水率（横軸）とマイクロ波式水分計を使用して推定した汚泥の含水率（縦軸）の決定係数は、0.8559 で、土壌水分計の 0.890 とほぼ同等であったが、平均測定誤差は 0.741% で、式(6) のキャリブレーション式を適用した土壌水分計の平均測定誤差 6.301% より優れていた。しかし、EC-5 Soil Moisture Sensor は、処理場ごとの特化したキャリブレーション式を作成することで、平均測定誤差が 1.716% (処理場 B の場合) まで減少し、改善の余地があることが示唆された。以上の結果より、マイクロ波式水分計

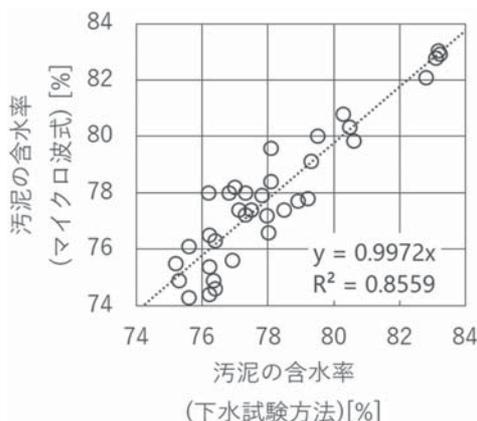


Fig. 8 Correlation Graph of Sewage Sludge Water Content with Gravimetric Method Versus Microwave Sensor

の方が土壌水分計より汚泥の含水率を的確に推定することができることが分かった。しかし、マイクロ波式水分計は、土壌水分計と比べ適用範囲が狭く、乾燥汚泥などへの適用が不可能である。一方、土壌水分計は、測定精度はやや劣るが、適用範囲が広いので、脱水汚泥より含水率が低い乾燥汚泥の含水率を推定する際にも適用が可能であり、脱水汚泥の乾燥プロセスなど、含水率が大幅に変動する場面で強みを持つと思われる。また、土壌水分計は、安価であり、簡便な方法で含水率の測定が可能であるため、今後、幅広い活用が期待される。

4. ま と め

近年、土壌学の分野では様々な誘電率法にもとづいた土壌水分計が土壌の含水率を計測する手段として、幅広く使用されている。EC-5 Soil Moisture Sensor は、安価であり、使用方法が簡便であるため、フィールド調査などでよく用いられている。本研究では、EC-5 Soil Moisture Sensor を脱水汚泥・乾燥汚泥のリアルタイム含水率計測に適用可能であることを提案した。しかしながら、EC-5 Soil Moisture Sensor は、計測の精度を担保するためには、計測対象に合ったキャリブレーション式を作成する必要がある。そこで、8 処理場の 9 種類の汚泥試料（脱水汚泥 8 種類、乾燥汚泥 1 種類）を用いて、幅広い含水率範囲において EC-5 Soil Moisture Sensor のキャリブレーション式を常温条件と高温条件の 2 条件において作成した。本研究で得た知見を、以下にまとめる。

- ・本研究で用いた汚泥試料の性状は、一部の処理場の汚泥試料の除き、日本全国 32 種の汚泥性状を調査した先行研究での報告の平均値 ± 標本標準偏差と概ね合致していた。
- ・本研究では、複数本の土壌水分計を使用したため、それぞれの水分計の個体差について 4 本の水分計を使用し、確認した。その結果、水分計のばらつきの平均は 3.20% で、個体差は無視できると考えられた。
- ・土壌水分計の正しい計測のため、ロッド部だけでなく、回路部の一部まで測定対象物質で満たされる必要があり、具体的には先端から高さ 7.5 cm、直径 3 cm 以上の空間が埋められる必要がある。
- ・土壌水分計による含水率計測には、温度が計測結果に影響することが知られている。温度依存性を確認した結果、 $0.145\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ であり、常温と高温におけるキャリブレーションの温度条件である $15\text{ } ^\circ\text{C} \sim 25\text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $50\text{ } ^\circ\text{C} \sim 70\text{ } ^\circ\text{C}$ の温度範囲での温度変化による影響は、最大で 8.0% に該当するため、精密な計測のためには、常温条件と高温条件において、

個別にキャリブレーションを行うことが望ましいと考えられる。各温度条件においては、常温条件では1.45%、高温条件では2.90%と、実用上問題はないと推察される。

- ・下水汚泥の含水率を推定するための土壌水分計のキャリブレーション式として、汚泥の含水率を目的変数、土壌水分計の出力値の3次式を説明変数とするキャリブレーション式として望ましいことが分かった。一つのキャリブレーション式で複数の汚泥試料の含水率を推定することが可能であり、本式の決定係数 $Adj. R^2=0.890$ で、強い相関を持っていることが確認され、平均測定誤差=6.301%であった。しかし、より精密な計測のためには、各汚泥試料に特化したキャリブレーション式を作成することが望ましい。この場合、平均測定誤差を最大1.716%まで改善することができた。
- ・既存の下水汚泥含水率リアルタイム計測技術であるマイクロ波式水分計と比較した場合、土壌水分計の平均測定誤差の方が大きく、含水率推定の精度は劣るが、土壌水分計はマイクロ波式水分計では推定が不可能な低含水率の乾燥汚泥などへ適用が可能であり、特に乾燥プロセスなど、含水率の変動が大きい場面で強みを持つと考えられた。

参考文献

- 1) 国土交通省ウェブサイト：資源・エネルギー循環の形成 (2020.1.24 閲覧) http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sew-erage/crd_sew-erage_tk_000124.html
- 2) 大野正：マイクロ波濃度計の使用上の留意点，紙パ技協誌，Vol. 54, No. 3, pp. 342-346 (2000)
- 3) 平井錬造，金子裕行，小林克行：マイクロ波濃度計，東芝レビュー，Vol. 56, No. 10, pp. 12-14 (2001)
- 4) 温室効果ガス排出抑制等指針検討委員会：上水道・工業用水道，下水道部門における温室効果ガス排出等の状況，(第7回) (2015)
- 5) 中島誠，井上光弘，澤田和男，クリスニコル：ADR法による土壌水分量の測定とキャリブレーション，40, pp. 509-519 (1998)
- 6) 近藤純正：降雨による表層土壌中の含水率の時間変化，水文・水資源学会誌，Vol. 6, No. 4, pp. 336-343 (1993)
- 7) 社団法人日本下水道協会：下水道統計 (2018年度)
- 8) 日本下水道協会：下水試験方法 (上巻)，pp. 715-716, 742-746 (2012)
- 9) 日本工業規格 JIS M 8819，石炭類及びコークス類——機器分析装置による元素分析法 (1997)
- 10) 建設省都市局下水道部，日本下水道事業団：下水道施設の省資源・省エネルギー化に関する技術調査，汚泥焼却炉の省エネルギー化に関する調査報告書，pp. 86-95 (1984)
- 11) 伊藤祐二，宮本英揮，安永円理子，江口壽彦，筑紫二郎：生物環境調節学分野におけるECH₂Oプロープの適用事例，土壌の物理性，pp. 33-36 (2010)
- 12) 井上光弘：ユーザーから見た市販マルチセンサーの測定精度の評価，土壌の物理性，No. 132, pp. 31-39 (2016)
- 13) Parsons, L. R. and Bandaranayake, W. M.: Performance of a new capacitance soil moisture probe in a sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 73, No. 4, pp. 1378-1385 (2009)
- 14) Ali, A. N., Drieberg M. and Sebastian P.: Deployment of MICAz mote for Wireless Sensor Network applications, 2011 IEEE International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE), pp. 303-308 (2011)
- 15) Kizito, F., Campbell, C. S., Campbell G. S., Cobos, D. R., Teare, B. L., Carter, B., Hopmans J. W. : Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor, *Journal of Hydrology*, Vol. 352, No. 3-4, pp. 367-378 (2008)
- 16) 井本博美，溝口勝，宮崎毅：豊浦砂・黒ボク土・立川ロームに対するECH₂Oプロープの特性，第47回土壌物理学会シンポジウム要旨，pp. 62-63 (2005)
- 17) 三石正一，山一平，溝口勝：デカゴン土壌水分センサーの簡易キャリブレーション方法，2008土壌水分ワークショップ要旨，pp. 115-120 (2008)
- 18) 井本博美，西村拓，宮崎毅：EC-5センサーのキャリブレーションとその適用，土壌の物理性，pp. 27-31 (2010)
- 19) 小林政広，酒井正治：2種類の土壌水分計のキャリブレーション，九州森林研究，No. 55, pp. 86-90 (2002)
- 20) Pepin, S., Livingston, N. J. and Hook, W. R.: Temperature dependent measurement errors in time domain reflectometry determinations of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59: pp. 38-43 (1995)
- 21) L. B. Mendes, H. Li, H. Xin and J. W. B. Nascimento : Evaluation of EC-5 soil moisture sensors for real-time determination of poultry manure or litter moisture content. *Applied engineering in agriculture*. Vol. 30, pp. 277-284 (2014)
- 22) METER GROUP Inc. ウェブサイト：ECH₂O EC-5 (2020.8.28 閲覧) <https://www.metergroup.com/environment/products/ec-5-soil-moisture-sensor/>
- 23) 松井駿佑，巖克弘，塩見浩，吉野竜平，国分剛：汚泥脱水工程におけるポリマー注入量制御システムの開発，第30回環境システム計測制御学会 (EICA) 研究発表会，Vol. 23, No. 2-3, pp. 115-120 (2018)
- 24) Mahzoun Yahya, 大下和徹，高岡昌輝，藤森崇：下水汚泥脱水ケーキの全国組成調査による有機物構成元素を中心とした変遷推定と高位発熱量の予測，下水道協会誌，Vol. 54, No. 659, pp. 86-96 (2017)
- 25) Davidson, W. D. and Cole, H. R.: Dielectric Relaxation in Glycerol, Propylene Glycol, and n-Propanol. *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 19, No. 12, pp. 1484-1490 (1951)
- 26) 三石正一，溝口勝：デカゴン土壌水分センサーの個体間のばらつきと簡易キャリブレーション法に関する一考察，第49回土壌物理学会講演要旨集，pp. 40-41 (2007)
- 27) Ye, Z., Tiansheng, H., Chileshe, J. M., Tao, W., & Ruijue, F.: Multi-factor evaluation and modeling correction of EC5 and 5TE soil moisture content sensors. *Trans. Chinese Soc. agric. Eng.*, Vol. 28 pp. 157-166 (2012).
- 28) G. C. Topp, J. L. Davis, and A. P. Annan.: Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, vol. 16, No. 3, pp. 574-582 (1980).
- 29) Mukhlisin Muhammad, Saputra Almushfi.: Performance Evaluation of Volumetric Water Content and Relative Permittivity Models. *The Scientific World Journal*. Vol. 2013, No. 1 (2013)

- 30) Bircher Simone, Andreasen Mie, Vuollet Johanna, Vehviläinen Juho, Rautiainen Kimmo, Jonard François, Weihermüller Lutz, Zakharova Elena, Wigneron Jean-Pierre, Kerr Yann.: Soil moisture sensor calibration for organic soil surface layers, *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, Vol. 5, pp. 109–125 (2016)
- 31) Cobos, D. R.: Calibrating ECH₂O soil moisture sensors. *Decagon Devices Application Note* (2009)
- 32) 藤原祐治, 向井圭司: バイオマス (鶏糞) ボイラ発電プラントの事例紹介, 日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集, Vol. 14, pp. 57–58 (2008)
- 33) Kargas George, Londra Paraskevi, Anastasatou Marianthi, Moustakas Nick.: The Effect of Soil Iron on the Estimation of Soil Water Content Using Dielectric Sensors, *Water*, Vol. 12, No. 598 (2020)

The Applicability of the Dielectric Soil Moisture Sensor to Real-time Measurement of Water Content in the Dried or Dewatered Sewage Sludge

Junyeong Yoo¹⁾, Kazuyuki Oshita^{1)†}, Masaki Takaoka¹⁾, Takashi Fujimori¹⁾ and Taketoshi Kusakabe¹⁾

¹⁾ Department of Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

† Correspondence should be addressed to Kazuyuki Oshita :
(Kyotodaigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540, Japan
E-mail : oshita.kazuyuki.6e@kyoto-u.ac.jp)

Abstract

Due to its high moisture content, fossil fuel is often used as auxiliary fuel in case of thermal treatment of sewage sludge. Real-time measurement of sewage sludge moisture content makes it possible to optimize the consumption of auxiliary fuel and process of thermal treatment. Thus, in this study, we examined the applicability of the dielectric soil moisture sensor as a handy method to measure the change of the sludge moisture content in real-time. The results indicate that we could establish single calibration equation for measuring the moisture content of multiple sludges. Independent variable is cubic function of the soil moisture sensor output voltage. This calibration equation yields good fit to the data (Adj. $R^2=0.890$), and average measurement error of sludge moisture content was 6.301%. Furthermore, making specialized calibration equation for each sludge is more desirable and it assured less measurement error of 1.716%.

Key words: dewatered sludge, dried sludge, moisture content, soil moisture sensor, real-time measurement