

下水道の脱炭素化を切り拓く センシング技術

吉田 航*
Wataru Yoshida
池田直樹*
Naoki Ikeda
藤原 拓†
Taku Fujiwara

金海秀紀‡
Hideki Kinkai

Sensing Technologies Leading the Way in Sewer System
Decarbonization

*三菱電機㈱ 先端技術総合研究所
†京都大学
‡㈱日水コン

要 旨

三菱電機では、下水道の脱炭素化に貢献できる二つのセンシング技術を開発している。脱水汚泥の含水率測定技術では、近赤外センサーを用いることで、従来の乾燥減量法より短時間で脱水汚泥の含水率を測定できる見込みを得た。これによって、測定結果を即座に現場運転に反映し、運転の安定化と脱炭素化の両立が期待される。N₂O(亜酸化窒素)ソフトセンシング技術では、水処理で排出される温室効果ガスN₂O量を機械学習によって推定することで、高価なN₂O計の設置を最小限に抑えて、その排出特性を把握することが可能になる。両技術は現場適用性が高く、今後もセンシングの精度向上と適用拡大を進めて、下水道の脱炭素化実現に貢献していく。

1. ま え が き

日本の下水道では、2030年度の温室効果ガス排出量を2013年度比208万t-CO₂削減することが地球温暖化対策計画の目標として掲げられている(2013年度排出量：約406万t-CO₂)。図1に下水道からの温室効果ガス排出量の割合を示す⁽¹⁾。日本全体の温室効果ガスの約0.5%(約530万t-CO₂)が下水道から排出されるが、最大要因は処理場の電力由来(53.7%)である。しかし、電力消費については省エネルギー機器や革新的技術の導入等の具体的な対応策が検討されており、下水道の脱炭素化実現には電力消費削減以外の対策が求められている。

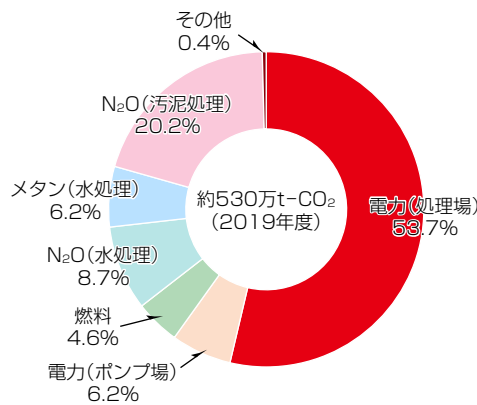


図1-下水道からの温室効果ガス排出量の割合⁽¹⁾

2番目に多く排出される温室効果ガスは汚泥処理でのN₂Oであり、20.2%を占める。一般には850℃以上の高温で脱水汚泥を焼却することで、N₂O排出量を抑制できるとされている。しかし、脱水汚泥の含水率は流入下水の性状等によって変動しやすく、これが焼却炉の安定運転を困難にしている。含水率が高いと水分の蒸発潜熱による吸熱が大きくなり、汚泥の発熱量が低下するため燃焼温度が下がり、逆に低いと過熱による設備損傷や煙道閉塞等による運転停止リスクが高まる。従来の含水率測定は乾燥減量法が用いられており、脱水汚泥の乾燥前後の質量から含水率を算出している。乾燥には1~2時間程度要するため、含水率の変化を素早く把握することは困難である。したがって、焼却炉の温度を常に監視しながら適正な焼却温度になるよう流動空気量や炉砂量を細かく調整する必要があり、運転員にとって大きな作業負担になっている。

また近年、水処理から排出されるN₂Oにも注目が集まっている。下水道から排出される温室効果ガスに占める割合は8.7%と他の項目に比べると小さいが、水処理からのN₂O排出はメカニズムが明らかになっておらず、明確な抑制対策が

立っていない。今後、他の排出要因への対応が進むに従って、水処理からのN₂O排出が脱炭素化実現のボトルネックになる可能性が指摘されている。N₂Oの排出特性を正確に把握するには計測器が不可欠だが、N₂O計は高価であり、複数の処理系列全てにN₂O計を導入することには経済的な障壁がある。

これらの背景を踏まえて、三菱電機では下水道の脱炭素化実現に貢献する新たなセンシング技術として脱水汚泥の含水率測定技術、及び水処理でのN₂Oソフトセンシング技術を開発している。

2. 含水率測定技術

水は分子構造や光の波長との相互作用によって700nm以上の赤外線を吸収する。特にO-Hの伸縮振動と変角振動による吸収帯である1,940nm、H-O-Hの伸縮振動による吸収帯である2,900nmやその半分の波長である1,450nmに大きな吸収を持つことが知られている。そこで今回、脱水汚泥の含水率測定のアプローチとして近赤外領域の波長を用いて汚泥中の水分量を推定する手法を試みた。

2.1 試験方法

今回対象とした脱水汚泥は、都市住宅地の排水を受水する分流式下水道から発生した初沈汚泥、余剰汚泥を濃縮した後、ベルトプレス脱水機で処理された汚泥である。含水率の測定は、下水処理場を維持管理する企業体の協力を受けて、維持管理業務の一環として実施した。当該下水処理場での脱水汚泥の測定は、作業員が脱水機1台につき乾燥減量法で毎日3回実施している。この試験では、その維持管理業務に近赤外センサーを用いた脱水汚泥の測定を追加した。測定は維持管理業務に従事している汚泥処理班の作業員数十名が担当した。測定手順を図2に示す。

乾燥減量法は、赤外線水分計を用いた。脱水汚泥はベルトプレス脱水機から板状で排出される汚泥を3か所から採取し、それらを数mmほどに砕いて混合した。そこから採取した汚泥を赤外線水分計で測定した。

近赤外センサーは、1,750nm～2,150nmまでの波長帯を持ち、採取・混合した後の汚泥を対象として吸光度を測定した。

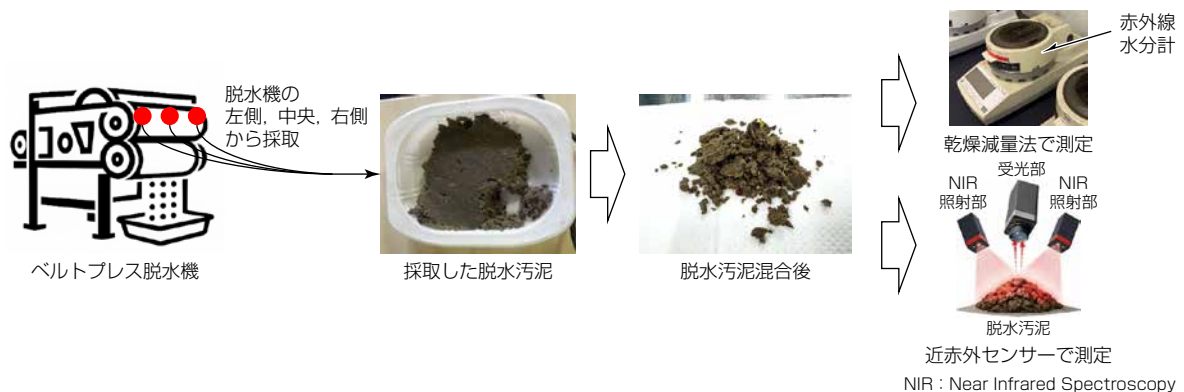


図2-脱水汚泥の含水率測定手順

2.2 結果

この節では、試験の結果を述べる。

2.2.1 吸光度と含水率の推移

図3に、試験期間中に測定した脱水汚泥の含水率及び吸光度(測定波長1,940nm)の経時変化を示す。脱水汚泥の含水率は、試験期間全体の平均値が76.5%であり、変動範囲はおおむね76.0～77.0%の間で安定していた。期間中の最大値は79.9%、最小値は75.1%であった。吸光度は、期間平均値が0.248であり、変動範囲は0.210～0.270で推移した。測定波長に対して水分子は強い吸収を示すため、汚泥中の水分量が多いほど照射光の吸収量が増加する。したがって、近赤外センサーによる吸光度測定値は、脱水汚泥の含水率と相関を持つと考えられる。そこで、近赤外吸光度から含水率を推定する回帰式を構築した。

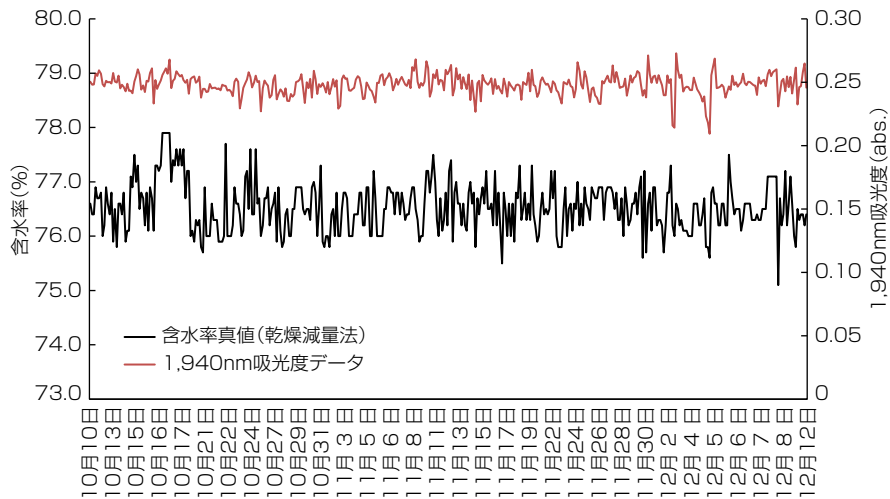


図3-脱水汚泥含水率と吸光度の推移

2.2.2 含水率推定精度

近赤外センサーで得られる光学スペクトルデータの解析では、オリジナルの吸光度スペクトルに加えて、その微分スペクトルを活用することで、より詳細な情報抽出や推定精度の向上が可能になる。そのためこの研究では、試験で得られた吸光度データ及びその微分データを用いて含水率を推定する回帰式を構築し、その精度について評価した。推定結果と乾燥減量法による実測値の関係を図4に示す。推定値は実測値と高い一致を示し、平均絶対誤差(MAE)は0.30%、平均絶対誤差率(MAPE)は0.39%であった。これらの値は、近赤外センサーによる吸光度測定と回帰式の組合せによって、実用上十分な精度で脱水汚泥の含水率を推定できることを示している。図5に示す推定誤差の度数分布では、全測定の約85%が誤差±0.6%以内に収まって、±1.0%を超える外れ値はほとんど確認されなかった。これによって、従来法では1~2時間を要していた含水率測定が、数分以内で実施可能になり、現場運転の安定化と脱炭素化の両立に寄与することが期待される。

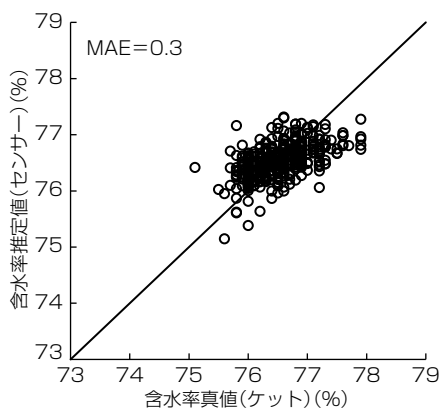


図4-脱水汚泥含水率推定値と真値の関係

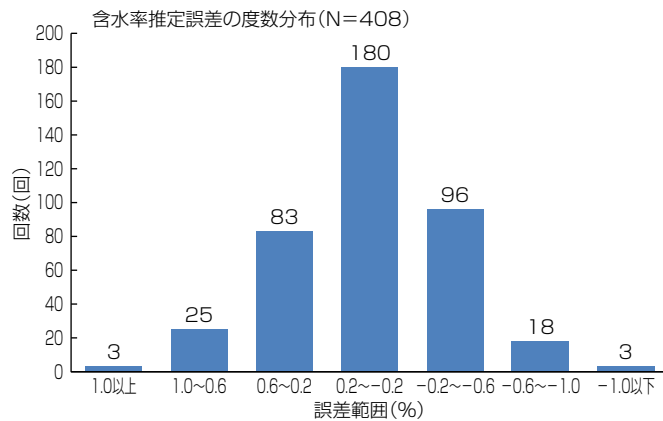


図5-含水率推定誤差の度数分布

3. N₂Oソフトセンシング技術

ソフトセンシングとは、過去のデータベースを用いて、測定が容易な変数を説明変数、測定困難な変数を目的変数として機械学習によって回帰モデル(推定モデル)を構築し、オンラインで得られるデータから測定困難な変数の値を推定する手法である⁽²⁾。今回、下水処理場で測定可能な水質項目を説明変数として、N₂O排出速度を推定するソフトセンシングの構築を試みた。なお、この開発は京都大学、(株)日水コンとの共同研究で実施している。

3.1 試験方法

図6にこの開発での試験池の設備構成を示す。高知県高須浄化センターの協力を受けて、AO法(嫌気好気法)反応池を対象として、 N_2O と関連水質項目の連続測定を実施した。 N_2O には溶存態 N_2O (D- N_2O)とガス態 N_2O (G- N_2O)が存在するが、D- N_2O は好気槽2と好気槽3の2か所で測定し、G- N_2O は一つの測定器を用いて各槽を順に測定した。さらに N_2O 排出速度の詳細な解析のため、嫌気槽でアンモニア態窒素(NH_4-N)とニコチンアミドアデニンジヌクレオチド(NADH)、好気槽2で溶存酸素濃度(DO)濃度、好気槽3で NH_4-N と硝酸態窒素・亜硝酸態窒素($NO_3-N \cdot NO_2-N$)を連続測定した。さらに、既往研究では N_2O 排出速度とアンモニア酸化速度の間に高い相関があることが報告されている⁽³⁾。そのため、嫌気槽での NH_4-N と好気槽3での NH_4-N の取得データ、及び池内の水の流下時間からアンモニア酸化速度を算出した。

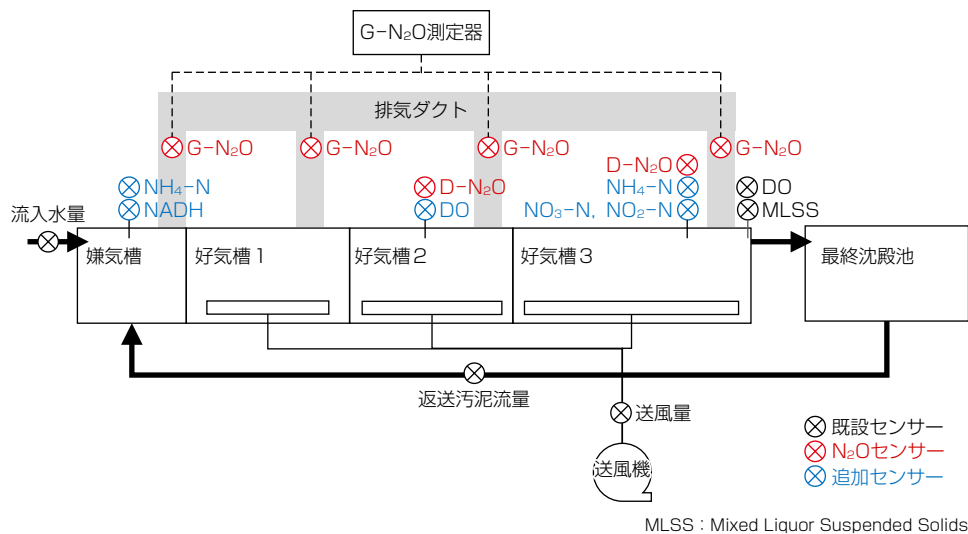


図6-試験池の設備構成

これらのデータに対して、相関分析によって N_2O 排出速度と相関係数の高い水質項目を選定した。その後、これらの水質項目を説明変数、 N_2O 排出速度を目的変数とした回帰モデルを構築した。取得データ期間の2024年11月15~28日に対して、最初の80%の期間を学習期間、残りの20%の期間を検証期間とした。

3.2 結果

表1に N_2O 排出速度と他の水質項目との相関係数を示す。相関係数0.6以上の強い相関が見られた項目は送風量、嫌気槽での NH_4-N 、好気槽2でのDO、好気槽3での NO_3-N 、好気槽3での NH_4-N 、アンモニア酸化速度であった。したがって、これらを説明変数として N_2O 排出速度の回帰モデルを構築した。

表1- N_2O 排出速度と他の水質項目との相関係数

水温	送風量	MLSS	嫌気槽 NH_4-N	嫌気槽 NADH	好気槽2 DO	好気槽3 NO_3-N	好気槽3 NO_2-N	好気槽3 NH_4-N	好気槽3 DO	アンモニア 酸化速度
-0.09	0.66	-0.29	0.84	0.26	0.81	0.93	-0.11	0.82	-0.53	0.82

図7に N_2O 排出速度の推定結果を示す。 N_2O 排出速度は日単位の周期的な変動が見られたが、回帰モデルによる推定値は学習期間、検証期間いずれも N_2O 排出速度の動的挙動をおおむね再現できたと考えられる。したがって、ソフトセンシングによって N_2O 排出速度を推定できる可能性が示唆された。なお、平均絶対誤差としては学習期間で3.39g-N/hr、検証期間で4.84g-N/hrであり、検証期間ではわずかに推定精度が悪化した。

今後、更なる精度向上を目指すとともに、季節変化等を含む長期的なデータを対象として、モデルの汎化性能を確認していく予定である。

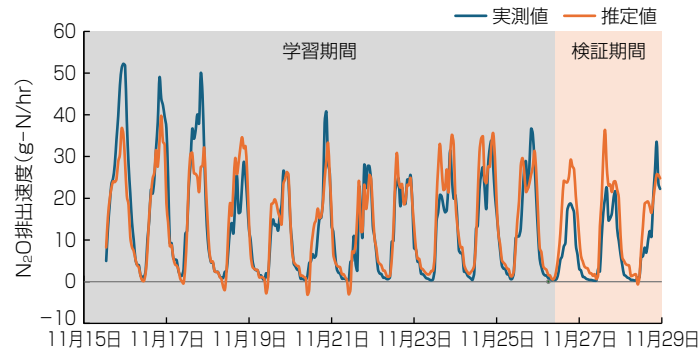


図7 -N₂O排出速度の推定結果

4. む す び

本稿で述べた含水率測定技術及びN₂Oソフトセンシング技術に関して、今後も更なる精度向上と適用範囲の拡大を目指して技術開発を継続し、下水道の脱炭素化実現に貢献していく。

最後に、N₂Oソフトセンシングの開発に協力いただいた高知県高須浄化センターの皆様へ感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：下水処理に伴うN₂O排出量の実態把握および削減に向けた調査，下水道技術開発会議エネルギー分科会（2024）
- (2) 船津公人，ほか：ソフトセンサー入門，コロナ社，7～8（2014）
- (3) 李 婷，ほか：実規模嫌気好気活性汚泥法におけるN₂O排出特性の長期評価と発生機構の推定，第59回日本水環境学会年会

