

マイクロ波の反射を利用した汚泥濃度計

豊岡和宏*、佐藤茂雄*、宮下朋史*

* (株)明電舎研究開発センター総合研究所環境研究部
東京都品川区大崎 2-1-17

概要

汚泥処理プロセスの運転は、固形物量や汚泥濃度に基づいて行うことが重要であり、そのため汚泥濃度を連続的に測定し運転管理や監視制御を行う必要がある。今回、マイクロ波の反射を利用した汚泥濃度計を開発した。検出器構造を工夫すると共に、単一の周波数ではなく、一定範囲の周波数域での反射強度を積算して汚泥濃度に変換する演算方式を用いることによって、流体の導電率変化の影響が小さく、安定した測定を実現した。本濃度計の測定原理及び性能試験結果について報告する。

キーワード

汚泥濃度、マイクロ波、計測器

1. はじめに

汚泥処理プロセスにおいては、安定した運転管理や監視制御を行うために汚泥濃度計が利用されている。従来から用いられている汚泥濃度計の測定方法としては、「超音波式」、「光学式」、「マイクロ波式」等がある。それぞれ原理的に、汚泥中の気泡、汚泥の色、導電率等の影響を受けるため、それらが測定対象汚泥を制限していたり測定値の誤差の原因となっている。今回、マイクロ波の反射を利用し、導電率の影響を小さくした汚泥濃度計(以後、マイクロ波反射式汚泥濃度計)を開発したので、その測定原理と性能評価の結果を報告する。

2. マイクロ波反射式汚泥濃度計の構造と概要

2.1 マイクロ波による汚泥濃度測定の基本原理

本濃度計では周波数が2[GHz]付近のマイクロ波を使用している。マイクロ波とは周波数が1~30[GHz]の電磁波である。この周波数領域においては汚泥中の固形物の比誘電率は有機物で3以下程度、無機物でも5以下程度であるのに対して、水の比誘電率は約80と固形物の誘電率と比較してかなり大きい。そのため、汚泥の誘電率は水道水などの真水と比較すると小さくなり、誘電率の小さくなった差分から汚泥濃度を求めることができる。ただし水の比誘電率は温度や導電率によって変化するので、測定に際してはこれらの影響を考慮する必要がある。温度の影響は温度計で補正できるが、導電率については汚泥中で安定して測定でき

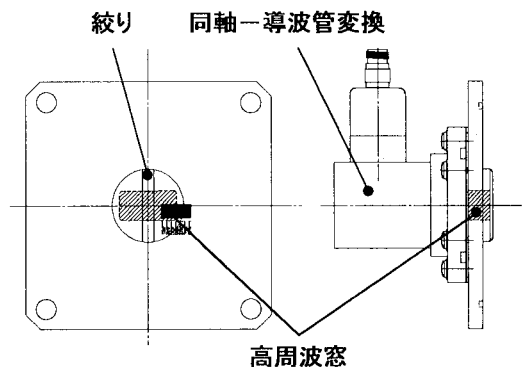


図-1 検出部の構造

る手段が無い。従って、マイクロ波式の汚泥濃度計においては導電率の影響低減は重要な課題である。

2.2 濃度計検出端の構造

マイクロ波測定法には、透過式と反射式の2種類がある。透過式は汚泥配管に発信器と受信器を対向に設けて透過波を検出する方式である。反射式は一個の検出部からマイクロ波を発信して、反射波を同じ検出部で受信する方式である。図-1に検出部の構造を、図-2に等価回路を示す。電源から発信されたマイクロ波は「同軸-導波管変換器」から「高周波窓」を経て「絞り」より汚泥中に投入される。以後、汚泥と検出部の境界を「アンテナ」と呼ぶことにする。マイクロ波を効率よく汚泥中に投入するには、アンテナでのマイクロ波の反射をできるだけ小さくすることが重要である。これを電気回路理論的に「マッチング(整合)をとる」という。反射係数 Γ は式-(1)で示される。

$$\Gamma = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \dots (1)$$

Z_0 : アンテナより電源側を見た場合のインピーダンス
 Z_1 : " 汚泥を見た場合のインピーダンス

ところで、汚泥のインピーダンス Z_1 は式-(2)のように示すことができる。

$$Z_1 = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \dots (2)$$

R : 汚泥のコンダクタンス[1/Ω]
 L : " インダクタンス[H]
 C : " キャパシタンス[F]
 j : 虚数単位 ($j^2 = -1$)
 ω : マイクロ波角周波数[rad/s]
 ($\omega = 2\pi f$, f : マイクロ波周波数[Hz])

汚泥中の固形分の変化は誘電率、つまり C の変化に相当し、イオン濃度の変化はコンダクタンス、つまり $1/R$ に相当する(L に関しては、汚泥の比透磁率はほとんど変わらないのでほぼ一定)。 C 、 R が変化すると Z_1 が変化し、反射係数 Γ も変化する。従って反射係数 Γ を測定することによって汚泥の濃度を求めることができる。

2.3 検出部の特性と測定方法

2.3.1 検出端の基本特性

図-3、図-4、図-5に、それぞれ濃度、温度、導電率に対する周波数-反射強度の特性を示す。ピーク強度は濃度や温度が高くなるにつれて深さが浅くなる。一方、導電率が高くなるとピーク強度の深さは変わらないがピーク周波数が高周波側にシフトする。

2.3.2 測定方法

周波数 2.1GHz ~ 2.3GHz の範囲内で、一定の周波数間隔で多数点の反射強度(単位は[dB])を足し合わせた値(以後、「積分値」と呼ぶ)を測定指標にした。図-6に示す通り、積分値は波形の

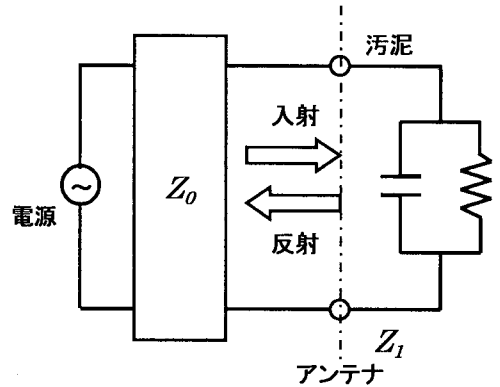


図-2 測定部の等価回路

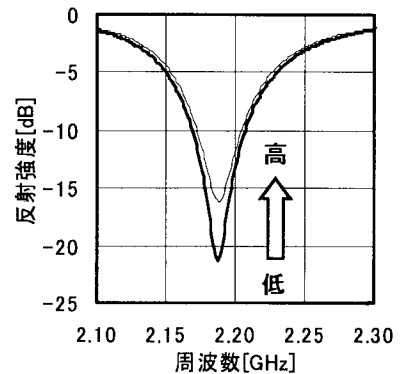


図-3 濃度特性

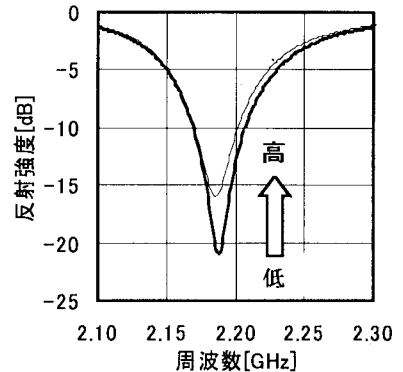


図-4 温度特性

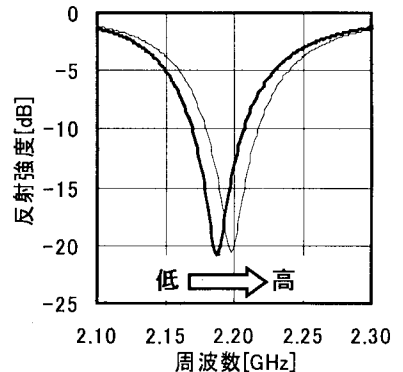


図-5 導電率特性

面積に対応している。本測定方法を積分法と呼ぶ。積分法を用いると波形がシフトしても、積分値には変化がないので、導電率の影響を抑制できる。積分法は、多数点測定による統計平均を行っているので、測定値を安定させる効果もある。

2. 3. 3 積分法を用いた特性

積分法を用いた濃度特性、温度特性をそれぞれ図-7、図-8に示す。濃度特性の寄与率（相関係数の二乗）は0.999と線形性が高く、感度も十分であった。温度による影響は比較的大きいが、温度特性も寄与率が0.999を越える線形性があるので、汚泥の温度を測ることにより温度の影響は正確に補正できる。

2. 3. 4 導電率の影響の低減化

導電率の影響は積分法を用いて効果的に抑制できるが、温度特性に若干の影響を与える。しかしながら、この特性には導電率が変化しても積分値が不変になる点が存在する。この点を不動点温度と呼ぶ。不動点温度は絞り等の設計で任意の温度に設定できる。つまり、原理的には測定対象の汚泥の濃度・温度・導電率のそれぞれ変動範囲の中心値においてマイクロ波をマッチングさせることによって、温度・導電率の影響を最小限に押さえることができる。

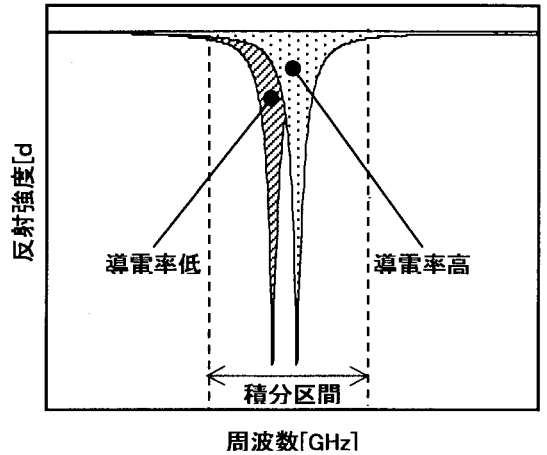


図-6 積分法

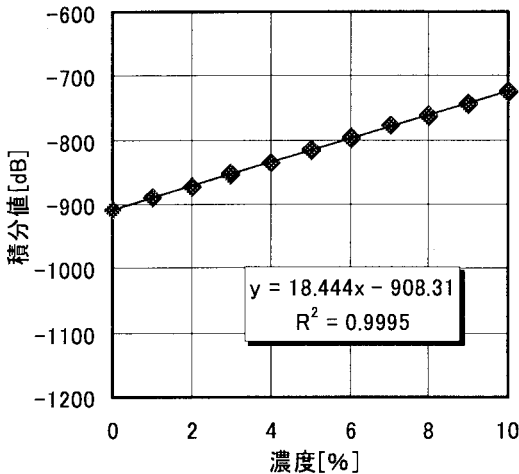


図-7 積分値の濃度特性

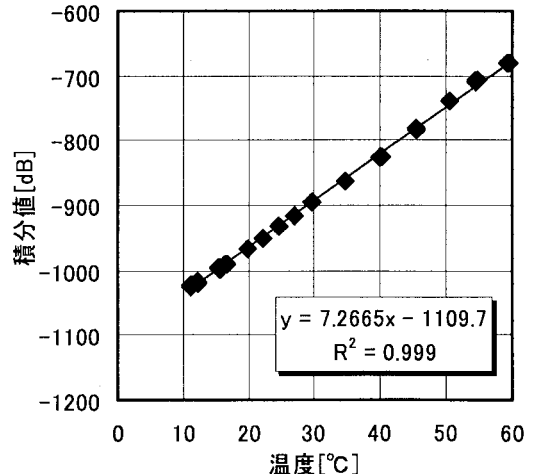


図-8 積分値の温度特性

3. 濃度計の試作と試験結果

3.1 室内試験

開発した検出端を用いた汚泥濃度計を試作した。試作器の外観写真を図-9に示す。検出パイプ、マイクロ波検出部、温度計、マイクロ波測定部等で構成されている。

図-10に示す評価試験装置に試作器を配管し、模擬汚泥を流して濃度測定試験を行った。模擬汚泥は、攪拌槽の水道水にセルローズ粉末を固形物濃度が0~10%になるように調整して投入した。手分析による濃度の測定は、サンプリング口から採取したサンプルのSSを下水試験方法に基づいて求めた。試験の結果を図-11に示す。横軸には手分析値を縦軸には試作器の濃度出力値を示した。濃度10%まで十分な直線性が得られた。

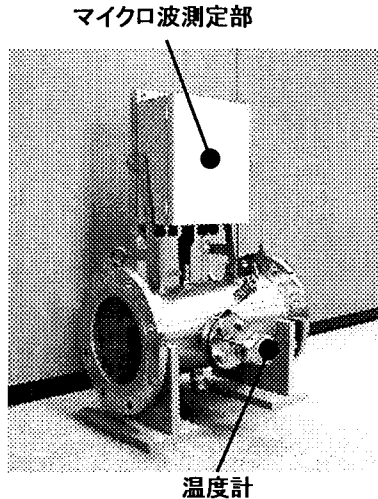


図-9 濃度計外観写真

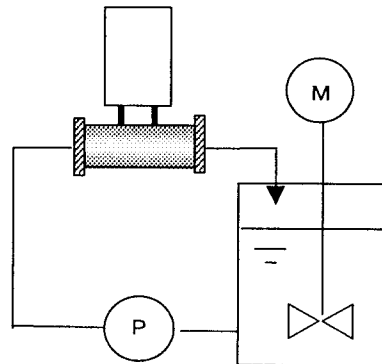


図-10 試験装置

3.2 フィールド試験結果

図-12にフィールド試験の結果を示す。汚泥処理場の重力濃縮槽出口に設置し、3ヶ月間メンテナンス無しで測定を行った。サンプリング口から採取したサンプルのTSを下式試験方法に基づいて求めて濃度計出力値との関係について検討した。横軸には手分析値を縦軸には試作器の濃度出力値を示した。試験場所は濃度変動が比較的大きく、サンプリングのタイミングによる誤差も含まれている。

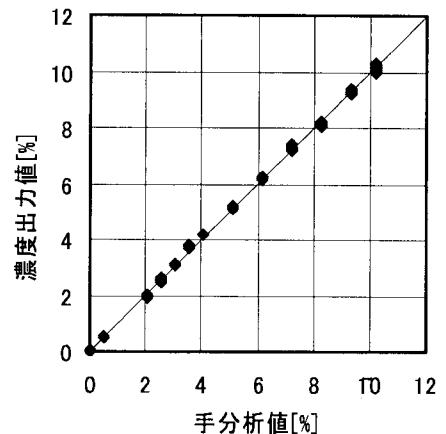


図-11 直線性試験

4. まとめ

- ①マイクロ波の反射を利用した汚泥濃度計を開発した（基本仕様は表-1の通り）。
- ②測定方法には積分法を採用した。その結果、導電率の影響が小さい、かつ、高濃度まで直線性が高い性能が得られた。透過式では配管を透過するマイクロ波の減衰が一定以上に大きくなると検出ができなくなるため、管径や導電率に上限の制約がある。これに対し、反射式においてはこれらの問題が原理的に存在せず、制約が小さい。従って広範な汚泥の測定が可能となった。

表-1 濃度計基本仕様

測定濃度範囲	0~10%
汚泥色の影響	なし
含有気泡の影響	小さい
使用導電率範囲	0~50mS/cm (精度補償は10mS/cmの導電率変化)
直線性	±2%フルスケール
繰り返し性	±2%フルスケール

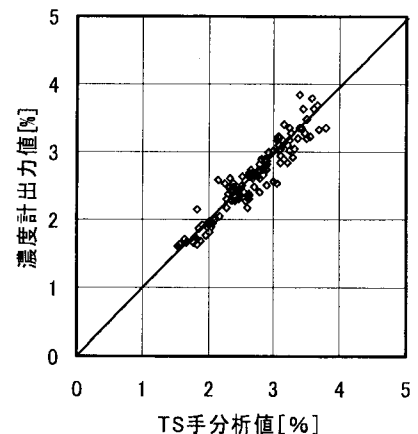


図-12 フィールド試験結果

参考文献：小西良弘「マイクロ波回路の基礎とその応用」、総合電子出版社
 香西 寛「マイクロ波工学」、オーム社
 大森ら 「高周波・マイクロ波測定」、コロナ社