

超音波濃度計の原理と測定例

1. 超音波濃度計とは

『超音波を使って、なぜ濃度が測れるのだろうか?』超音波濃度計を使うとき第一に感じる疑問だと思います。これは、私達が濃度計を開発するとき、第一に直面した疑問『どうすれば、超音波を使って濃度が測れるのだろうか?』という疑問と表裏一体をなすものだと思います。

私達は、先ずバケツに何杯かのスラリー(固体粒子が液体の中に懸濁している流動体)を汲んできて、あるものは上澄みをはねて濃くし、あるものは清水を入れて薄め、また、あるものはそのままに、というように何種類かの濃さの異なるスラリーを作り、超音波の伝わり具合を調べました。勿論スラリーは放置しておくとも、固体粒子が沈んでしまうので、攪拌しながら測定しなくてはなりません。その結果『スラリーの濃度と超音波の弱まる程度』は比例関係にある、ということが分かりました。

以上のことから、超音波濃度計とは、超音波の減衰量(超音波の弱まる程度)が、スラリー中の固体粒子(浮遊物質)濃度(以下 SS 濃度)に対して、比例関係にあることを利用して、スラリーの濃度を測定する計測器です。

2. 超音波濃度計の原理

送信子から放射された超音波信号は、スラリー中の粒子界面での散乱および粘性や粒子の内部摩擦によって減衰しながら、もう一方の受信子に到達します。超音波の減衰量は、スラリー中の SS 濃度と比例関係にあるので、受信子に到達した超音波信号の強度の変化を検知し、減衰量を測定することで SS 濃度を測定することができます。

回路は CPU(中央制御部)、送信パルス部、受信部、シンセサイザ部、D/A 変換部、制御出力部、濃度表示・各種設定操作パネル、電源部から構成されています。図 1 に示す測定系統図において、CPU(中央制御部)で規制された時間だけ、高周波信号を発信し、送受信子を駆動します。送信子から受信子に到達した超音波信号は微弱なため、増幅して濃度に比例した電圧を取出します。この電圧を CPU(中央制御部)で処理して、濃度表示部へ出力します。D/A 変換器部では、濃度に比例した電流(DC4~20mA)に変換して出力します。

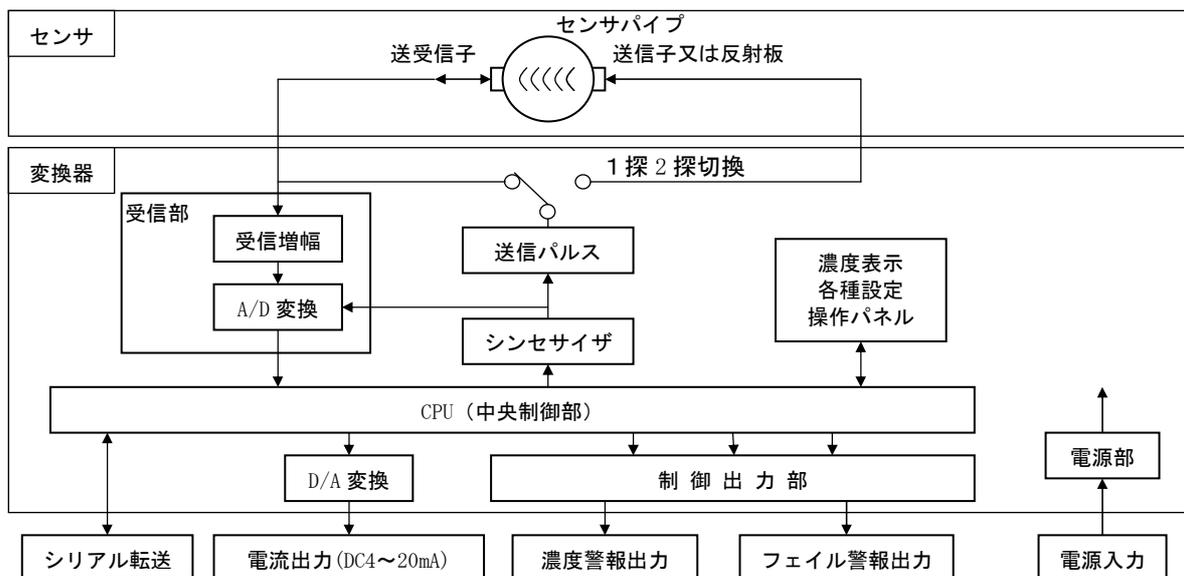


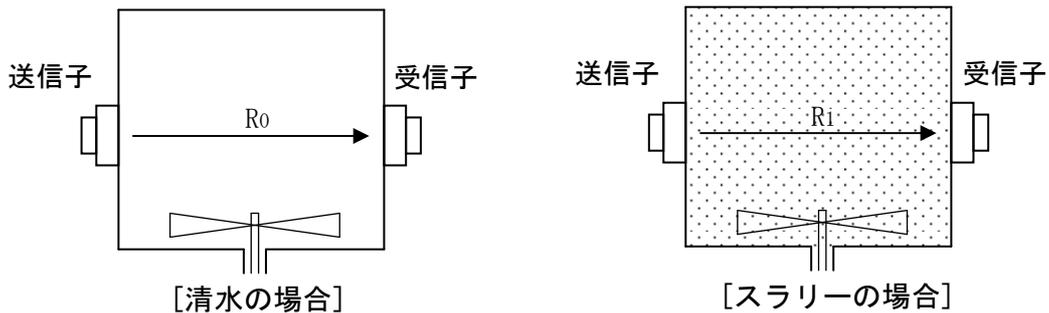
図 1 測定系統図

スラリーによって、超音波が減衰を受けると、発振条件が満足されなくなり振幅が減少します。その時に受信部の受信増幅回路が振幅の減少を検知して、受信増幅の利得を増加させるよう制御電圧を発生させます。この制御電圧の対数をとることによって、濃度と指示の関係が直線関係となります。

2. 1 スラリー濃度と超音波の減衰量

清水の場合 : 送信子から出た超音波は、殆ど弱められずに送信子から受信子に到達します。このときの受信電圧を R0 とします。

スラリーの場合 : 送信子から出た超音波は汚泥によって弱められるため、受信子に到達する超音波は清水のときより弱くなります。このときの受信電圧を R1 とします。



減衰量の単位であるデシベル (dB) とは、電気信号や音の強さの相対値を表すときによく使われる単位で、この場合は、清水のときの受信電圧 R0、スラリーのときの受信電圧を R1 とすると、このときの超音波の減衰量は、以下の式により求められます。

$$20 \log \frac{R1}{R0} = \text{減衰量(dB)}$$

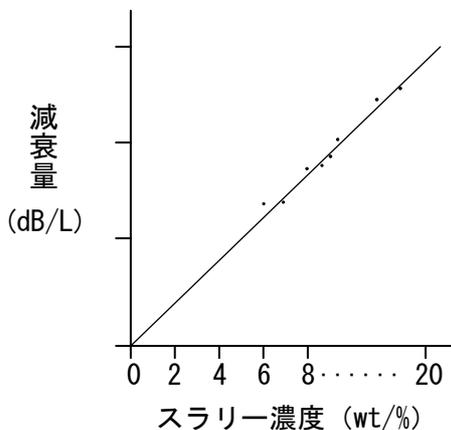


図 2 濃度と減衰量の関係

減衰量をデシベル (dB) という単位を使って表すと、スラリー濃度との関係が完全に直線になることが分かります (図 2)。

このことを式で表すと次のようになります。

$$C = k \alpha \dots \dots \dots (1)$$

C : スラリー濃度 (wt/%)

α : 減衰量 (dB)

k : 比例定数

3. 超音波濃度計の特徴

①測定対象が広い

超音波を用いて測定するので、色・pH・電気伝導度・スラリーの流速の変動, 乱流などに影響されることがなく、また、乳化粒子など不均質な懸濁粒子を含む液体でも、粒子形状に関係なく測定できます。

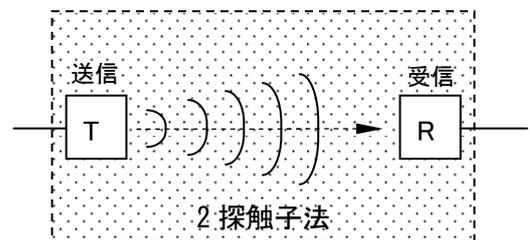
②高濃度懸濁液の測定が可能

超音波濃度計は、光やレーザ方式が不得意とする高濃度の測定にも優れており、それらを用いるより安価であることから汎用性に優れています。また、1MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz と数種類の機種があるため、低濃度から高濃度まで広い測定レンジで、さまざまなスラリーのインライン計測および制御が可能です。

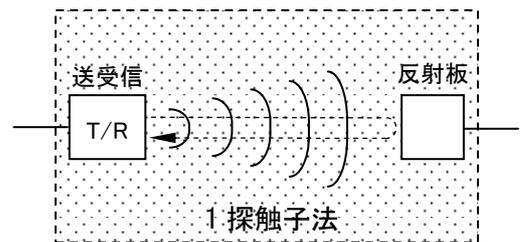
4. 送受信子間の距離

超音波濃度計は、超音波の減衰量から濃度を測定するので、同じ濃度の液でも送受信子間の距離（以下センサピッチ）が変われば指示は変わります。超音波の減衰量は、送受信子間の距離に比例します。例えばセンサピッチを 100mm から 200mm にすると、減衰量もほぼ 2 倍となります。また、センサピッチを半分の 100mm から 50mm にした場合は、減衰量はほぼ半分となります。送受信子間の距離は、測定方法（2 探触子法, 1 探触子法）によっても変わってきます。

2 探触子法：一方から送信し、もう一方で受信します。
超音波パルスの伝播距離は、センサピッチと同じ長さになります。



1 探触子法：片側のみで送受信をし、もう片方は反射板として使用します。伝播距離が長い分、超音波が減衰します。



5. 減衰量と周波数の関係

超音波濃度計には、測定周波数の異なる 6 種類（0.5, 1, 2, 3, 5, 10MHz）の機種があります。低い周波数ほど波長が長く透過力が強いので、高濃度であるほど低い周波数を使用します。また、周波数が高いほど超音波は減衰するので、ごく低濃度の測定であれば、高い周波数で送受信子の距離の長いものを使用します。

6. 気泡を含むスラリーの濃度測定

6. 1 従来の問題点

超音波濃度計のスラリー中の SS 濃度を測定する原理は、超音波の減衰量を測定し、濃度換算する方式です。しかし、スラリー中に気泡が混在しているとその影響分も加算された減衰量となり、誤差が生じます。予めこの誤差を測定し補正する方法では、運転条件により気泡の混在量が大幅に変化することがあるため、計器としては補正しきれなくなるという問題があります。

6. 2 新しい測定方法

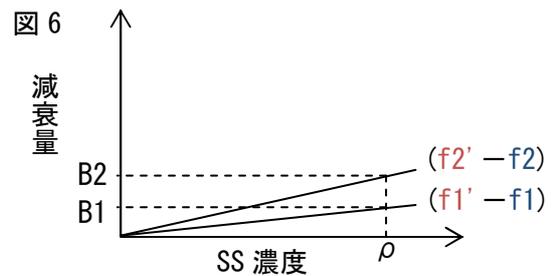
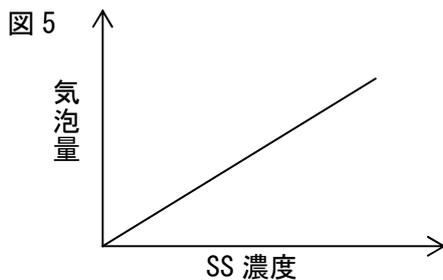
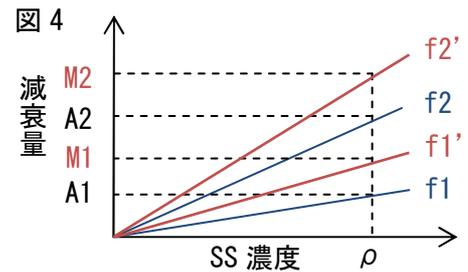
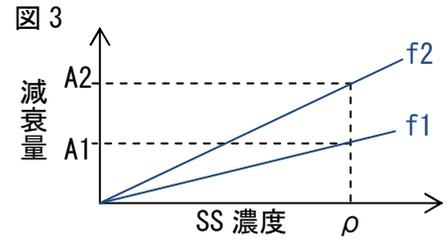
従来の問題点の解決法として、二周波測定を行い既知の補正係数を用いることで、測定結果

を補正し、気泡量の影響なくスラリー濃度のみを出力することができる可能性が見えてきます。実機では一組のセンサで三周波切替測定を行い、そのうちの二周波を選択する方法を進めています。

6. 3 測定理論

一般に気泡の影響がなければスラリー濃度と超音波減衰量はほぼ比例関係にあります。これを異なる周波数 f_1 , f_2 で測定した場合は図 3 のように二つの検量線が得られ、SS 濃度 ρ に対し減衰量 A_1 , A_2 がそれぞれ対応します。しかし、実際のスラリー中に気泡が混在している場合、前記 A_1 , A_2 は図 4 の M_1 , M_2 の値となり、現実に測定できるのはこの値で気泡を含んだ減衰量となります。

一方、図 5 のごとく気泡含有量もほぼ SS 濃度に比例関係にあるため、気泡に基づく超音波減衰量は、図 6 のように B_1 , B_2 で示されます。従って図 4 の M_1 , M_2 は、図 3 の減衰量 (A_1 , A_2) と図 6 の気泡に基づく減衰量との加算したものと考えられます。



以上の観点により、図 4 の測定値 (M_1 , M_2) から実際の SS 濃度を換算するには、以下の式により求められます。

$$M_1 = \underbrace{a_1}_{A_1} \cdot X + \underbrace{b_1}_{B_1} \cdot Y \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$M_2 = \underbrace{a_2}_{A_2} \cdot X + \underbrace{b_2}_{B_2} \cdot Y \quad \dots \dots \dots (2)$$

(1), (2) より

$$X = \frac{b_1 \cdot M_2 - b_2 \cdot M_1}{a_2 \cdot b_1 - a_1 \cdot b_2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

となり、 Y (気泡量) の項が消えます。

ここで、 $a_2 / a_1 = K_a$ 、 $b_2 / b_1 = K_b$ とし、(3) より次式が得られます。

$$X = \frac{M_2 - K_b \cdot M_1}{a_1 (K_a - K_b)} \quad \dots \dots \dots (4)$$

- 1 : 測定周波数 (基準周波数)
- 2 : 測定周波数 (比較周波数)
- M : 減衰測定値 (dB)
- X : SS 濃度 (wt%)
- a : SS 減衰係数 (dB/wt%)
- Y : 気泡量 (%)
- b : 気泡減衰係数 (dB/%)
- K_a : 設定値
- K_b : 設定値

- ※ a_1 は次の式により算出
- $a_1 = S \times G / F \times 1000$
- S : スパン (設定値)
- G : 減衰フルスケール (設定値)
- F : フルスケール濃度 (設定値)

(4) 式より a_1 (基準周波数の減衰係数)、 K_a (比較/基準のSS減衰係数比)、 K_b (比較/基準の気泡減衰係数比) が解っている場合に、二周波測定をすることによって Y (気泡量) の影響をキャンセルして X (実際のSS濃度) を求めることができます。

6. 4 気泡の共振径

以上の説明は簡単な近似で、実際の解析は複雑です。すなわち超音波の周波数と気泡の大きさ如何によっては共振現象を起こし、減衰量は直線的でなく大きく変化するからです。しかし、共振周波数を f_a 、気泡半径を r とすると近似的に(5)式で表され、スラリー濃度を測定する1~5MHzの周波数では $r = 3 \sim 0.6 \mu\text{m}$ となり、実際の気泡分布は $10 \mu\text{m}$ 程度であるので、共振点より高い周波数で測定しているという前提で実用的には問題はないと思われれます。

$$r = 3.32 / f_a \text{ (mm)} \dots \dots \dots (5)$$

7. 超音波濃度計の応用

超音波濃度計の用途としては、下記のものがありますが、このうち①項と②項について詳述します。

- ①排煙脱硫プラントの石灰および石膏スラリーの濃度測定
- ②生コンスラッジ水の濃度測定やシックナーのスラッジ界面レベル検知
- ③電着塗料、顔料、インクなどの生産プロセスにおける濃度管理
- ④シリカ、アルミナ、セリウム等の研磨剤の濃度測定や鋳物や鍛造における離型剤の濃度測定
- ⑤化学や食品プラントにおける汚泥・汚水、廃液・産廃排水処理スラリーの濃度測定
- ⑥製紙廃液のパルプ濃度測定および製紙品種管理における濃度測定
- ⑦セラミックス、金属粉、電子材料等
- ⑧化学工業において界面活性剤などのエマルジョンの濃度測定

7. 1 応用例詳細

①石灰スラリーの濃度測定

排煙脱硫装置、その他の化学プラントの基礎原料として石灰スラリーを製造する工程があります。この工程で製造する石灰スラリーの濃度を管理することは、後工程への影響を考えると、極めて重要です。超音波濃度計は、石灰スラリータンクの循環または移送ポンプ出口に取付けることによって、タンク中の石灰スラリーの濃度を把握し、石灰スラリータンクへの石灰粉の投入量および清水の投入量を制御することによって、常に一定濃度の石灰スラリーを製造することができます。ここでのポイントは、使用する石灰粉の粒径を如何に一定に保つかという点にあります。石灰粉の粒径が変化すると、超音波濃度計に対する検量線が変化するので、同一指示に対する濃度が異なってしまうので、注意が必要です。

②石膏の濃度測定

排煙プラントの晶析槽から出た石膏スラリーは、シックナーにより濃縮される。シックナーの出口濃度を超音波濃度計で監視することによって、一定以上の濃度になったスラリーを脱水機に移し、製品石膏として取出すことができます。ここでのポイントは、石膏スラリーの粒径の変化幅を如何に小さく抑えるかという点と、多少の粒径変化の影響が指示が変化しても、シックナーや脱水機に過大な負荷が掛からないような運転条件の設定にあります。

③生コンスラッジの濃度測定

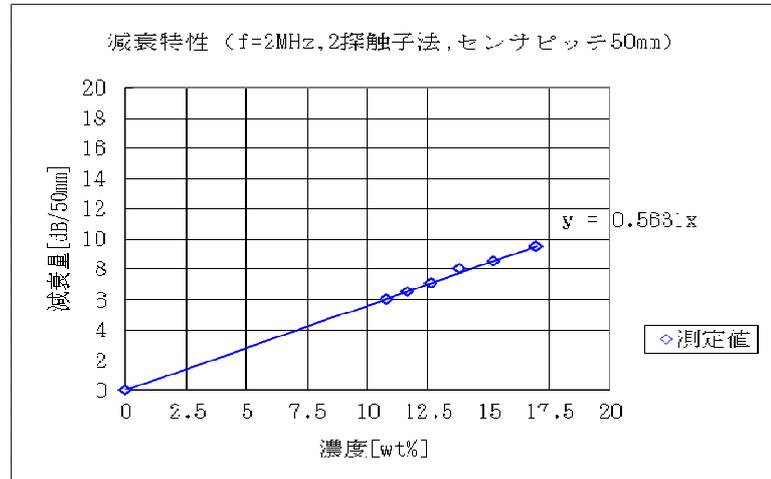
生コンスラッジの濃度測定は、パッチャープラントにおいて生コン車の洗浄に使用した後の排水を再利用し、経済効率を上げる狙いで使用される。計量タンクの前の圧力タンクに浸漬

型の濃度計センサを取付けるかあるいはスラリー供給タンクからの移送ポンプの出口にパイプ型センサを取付けて、練り水に使用するスラッジ水の濃度を監視し、一定濃度以下に保つようになっています。近年、国内外においても環境問題に対する意識が高まり、本濃度計の使用例が増えています。

7. 2 測定例

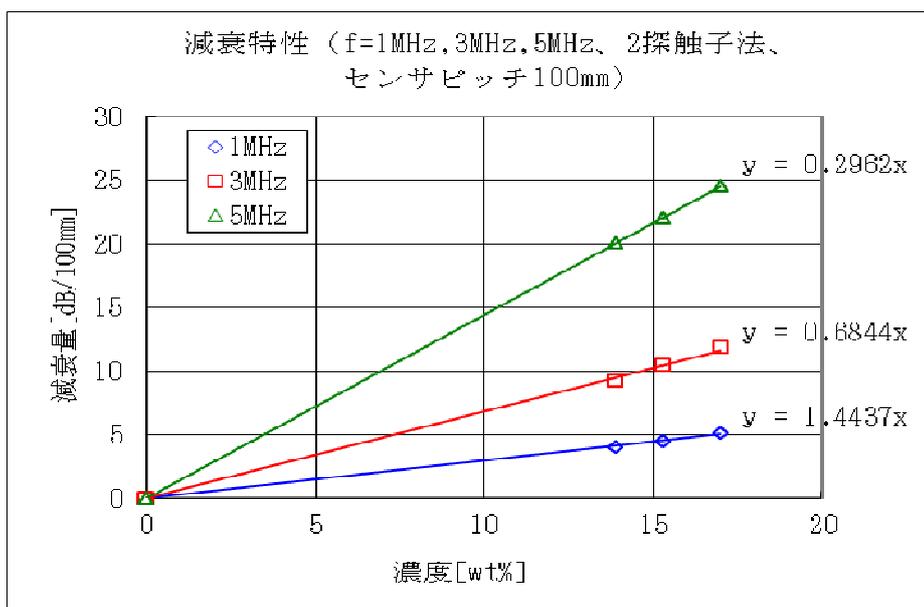
①石灰スラリー測定例

濃度 [wt%]	測定値 [dB/50mm]
16.95	9.5
15.20	8.5
13.80	8.0
12.63	7.1
11.63	6.5
10.78	6.0
0.00	0.0



②石膏スラリー測定例

濃度 [wt%]	1MHz [dB/100mm]	3MHz [dB/100mm]	5MHz [dB/100mm]
17.0	5.15	11.88	24.55
15.3	4.51	10.43	22.06
13.9	4.00	9.26	20.09
0.0	0.00	0.00	0.00



8. まとめ

以上のとおり、超音波濃度計は取付け時に十分な配慮をしておけば、機械的な可動部がないため運転中に手を入れる必要もなく、メンテナンスフリーで長期にわたり測定可能です。また、センサは測定場所に応じて浸漬型とパイプ型から選択できるため、連続操業のプラントにおいても数多くの実績を重ねています。