

# 超音波レベル計の原理と測定例

## 1. 超音波レベル計とは

超音波レベル計とは、センサから空気中へ放たれた超音波パルスが、対象物からはね返り再びセンサに受信されるまでの伝搬時間(往復時間)を測定することで距離を求めることができる計測器です。測定した伝搬時間をレベルとして表示したり、電流出力(4~20mA)として伝送したりすることができます。また、超音波レベル計は非接触であるため、河川や上下水道、貯水槽、薬品タンクの水位・レベル計測など幅広い用途に使用されています。

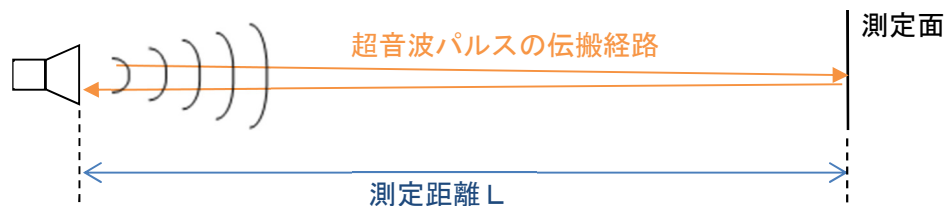
## 2. 超音波式の利点

レベル計測の測定方式には多くの種類があり、それぞれ一長一短を持っています。一般的にレベル計測に用いられる計測器は、接触方式と非接触方式に分類されます。接触方式の計測器には、液体の圧力の原理を利用した投込圧力式やエアパージ式、水面の浮力の原理を利用したフロート式などがあります。いずれも計測器としては比較的安価で取り扱いが簡便であるというメリットはありますが、接液式のため付着や詰まり、腐食などがあるところでは定期的に清掃が必要になります。また、防波管工事など据付工事にもコストが掛かることがあり、粘性の強い液体や高温の場所では使用できないこともあります。一方、非接触方式は、外力や付着、腐液の影響を受け難いことからメンテナンス性に優れており、また、取付けが容易であることから据付工事も安価です。

非接触方式の計測器には、マイクロ波(電磁波)式やレーザー式、そして超音波式などが挙げられます。マイクロ波式などは、伝播速度(音速)が約300,000km/secと超音波のおよそ100万倍であるため、測定経路上の気体の状態(温度・圧力)の影響はほとんど受けませんが、超音波式と比較すると高価です。したがって、測定環境によってはマイクロ波式やレーザー式が好まれ場合もありますが、近年では超音波式の測定精度や耐候性なども向上していることもあり、経済面から見ても汎用性は超音波式の方が高くなっています。

## 3. 超音波レベル計の原理

センサから発信する超音波パルスが、被測定面で反射し再びセンサに受信されるまでの伝搬時間(往復時間)を測定し、距離に換算しています。すなわち、センサと測定面の距離が短い場合は往復時間は短く、センサと測定面の距離が長い場合には往復時間は長くなります。実際の測定では、液面(測定面)の上昇や下降により往復時間が変動し、その往復時間をレベル信号に変換しています。



超音波パルスの伝搬速度を  $V$ 、送信から受信までの伝搬時間を  $T$  とすると、センサから測定面までの距離  $L$  は次の式により求めることができます。

$$\text{測定距離 } L = \text{速度 } V \times \frac{\text{時間 } T}{2} \quad \text{※時間 } T \text{ は往復時間なので } 2 \text{ で除算する。}$$

伝搬速度とはいわゆる音速のことで、空気中(65%RH, 常圧)では次の式により求められます。

$$\text{音速 } C[\text{m/s}] = 331.45 + 0.61t \quad t: \text{周囲温度}$$

音速  $C$  は周囲温度  $t$  によって変わるので、常に周囲温度の測定が必要となってきます。超音波レベル計では、センサ内部に温度計(温度センサ)を内蔵することが一般的であり、常時温度データを検出することで自動的に温度補正を行い、正確な測定を行っています。

#### 4. 測定距離と周波数の関係

超音波は音であるため、空気中を伝播する超音波は空気によって次第に音圧が減少します。この超音波の伝搬に伴う音圧の低下(音波の振幅低下)を減衰といいます。減衰の度合いである減衰率は周波数に依存しており、周波数が高いほど減衰率が高いため、遠くまで伝達できません。減衰率は物質の密度や濃度によっても異なりますが、空気中の場合は減衰率が高く、高周波であるほど長距離の測定は困難となります。但し、繰返し周期が多くなるため、高い分解能で測定することができます。逆に低い周波数であれば減衰率が低いため、長距離の測定が可能となりますが、超音波発振後の残響が大きく短距離の測定はできません。図1は空中へ放射した超音波の減衰特性を表したものです。図から分かるように、超音波の周波数(振動数)が高ければ高いほどその減衰も大きく伝搬距離が短くなります。伝搬距離を延ばすには低い周波数が有利となりますが、周波数が低下すると距離計測の分解能が低下し、また、周波数が低くなればそれに対応して超音波を発生させる素子(振動子)の形状も大きくなるため、センサの形状も大きくなります。

以上のことから、多彩な用途がある超音波計測の分野において、その用途に応じた適切な周波数を選ぶことが必要となります。

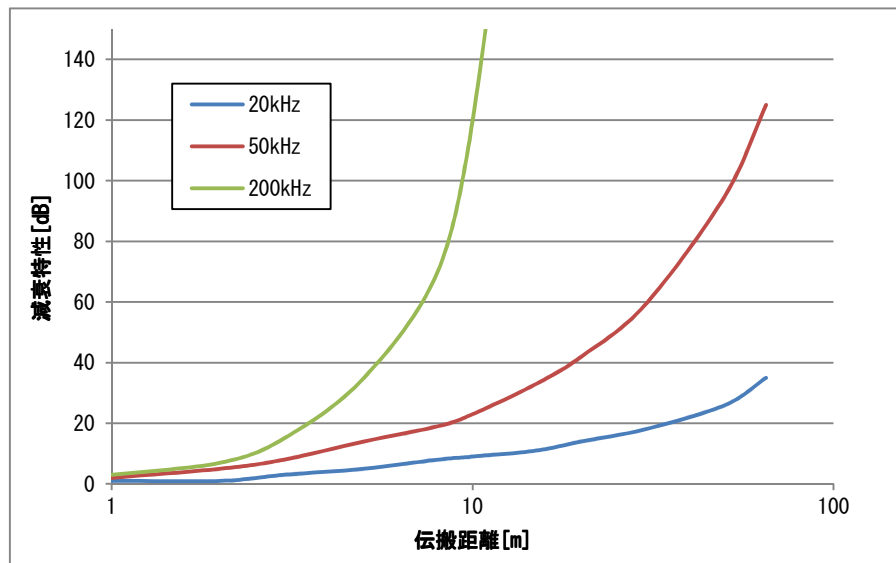


図1 空中超音波の減衰特性

#### 5. 指向性と周波数の関係

指向性とは、音波の伝搬する強さが方向によって異なる性質のことで、音波の広がり具合や強度の目安となるものです。音源から超音波が放射されたとき、遠方の任意の位置での音圧は、正面からずれるに従い、音源からの距離に差異が生じ位相差が現れます。これが音源に指向性を与えています。このように方向特性が一樣でないものを指向性があるといい、方向特性がまったく一樣なものを指向性がない(無指向性)といいます。レベル計では、指向性の指標として指向角 $\theta$ (音圧半減角)がよく使われます。指向角とは、その中心軸の音圧に対し音圧が1/2に減少する角度のことをいい、指向角が狭いほど音の広がりはいわゆる少ないといえます。超音波レベル計は、センサから一定の広がりを持ってビーム状に超音波パルスが放射されます。このビームの形状が超音波

レベル計の指向性であり、主方向に生じたビームをメインローブ(主極)、これ以外の外側方向へのビームをサイドローブ(副極)といいます。一般にサイドローブはメインローブに比べて小さいので、サイドローブが指向角内に含まれることはありません。音の指向性は、周波数と関係があり、たとえば周波数が高いと減衰は大きくなりますが、指向性は良くなり分解能も良くなります。また、指向性は音源の振動面の面積と波長との関係で決定されます。波長に対して振動面の面積が大きいほど、また、波長が短いほど鋭い指向性が得られます。例えば、振動面の面積が同じであるならば、周波数が高いほど強い指向性を持つこととなります。超音波レベル計は、距離方向への分解能には優れていますが、横方向への分解能は良くないという特徴があり、一般的に距離計測に使用される場合は、距離方向への分解能の良い鋭い指向性(狭ビーム、低サイドローブ)が望まれます。

以上のことから、指向性を高めるには周波数の高いものが良く、精度を必要とする距離計測においては指向性を高めるため、分解能の良い周波数の高いものを使用します。但し、4項で述べたように、伝搬距離を延ばすには低い周波数である必要がありますので、それらの配慮も必要となります。

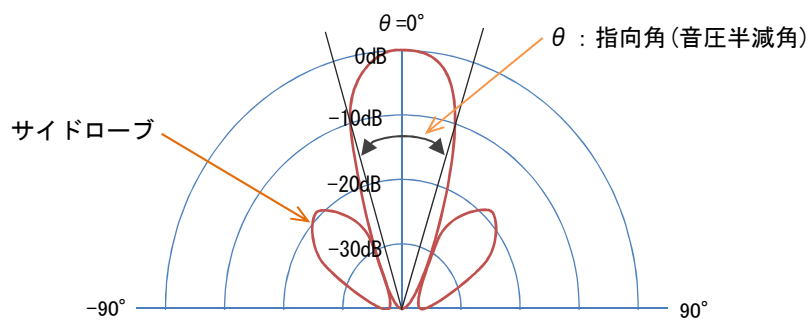


図 2 指向性特性

## 6. 超音波の反射率

レベル計の測定精度は、周波数と測定距離に依存していますが、受信感度(強度)は音の減衰が影響してきます。減衰はとくに液面の状態に大きく影響され、液面が静止している状態であれば、受信感度は十分に得ることができますが、実際の測定環境では液面が静止している状態はほとんどなく常に流れがあり、また、液面上にスカムや多量の泡などがあると、超音波が減衰してしまい必要な受信感度が得られないことがあります。ここで液面からの反射率を考慮した場合、音波が異なる媒質に入射すると、境界面で媒質の固有音響インピーダンスの違いにより入射波の一部が反射し、残りは透過します。したがって、反射率が低いとその分だけ音は減衰するといえます。空気中から水面へ超音波パルスが垂直に入射したときの音の反射率 R は、次の式により求めることができます。

$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad \text{①}$$

$Z_1$  : 媒質 1 の固有音響インピーダンス。空気の場合  $4.1 \times 10^2$  [N・s/m<sup>3</sup>]

$Z_2$  : 媒質 2 の固有音響インピーダンス。水の場合  $1.5 \times 10^6$  [N・s/m<sup>3</sup>]

①式より空気中における超音波の水面での反射率 R は、

$$R = \frac{(4.1 \times 10^2 - 1.5 \times 10^6)^2}{(4.1 \times 10^2 + 1.5 \times 10^6)^2} \doteq 0.999$$

となり、99.9%が反射することがわかります。一方、透過率 T は、

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{4 \times 4.1 \times 10^2 \times 1.5 \times 10^6}{(4.1 \times 10^2 + 1.5 \times 10^6)^2} \doteq 1.093 \times 10^{-3} [\%]$$

となり、水中にはほとんど音は透過しません。また、透過率 T より、透過損失 TL (入射した音と透過した音との音圧レベルの差) を求めると、

$$TL = 10 \log_{10} 1/T \doteq 29.614$$

となり、透過損失は 30dB ほどであることがわかります。これは透過後の音のエネルギーがおおよそ 1/1000 になったことを意味します。よって、液面に超音波パルスが垂直に入射されたときの境界面での音の減衰は、ほぼゼロであると言えます。

以上のことから、液面の状態によって反射率が変化し、減衰に影響することで受信感度も変わってくるため、実際の測定環境では、液面の状態を十分に安定させてやる必要があります。

## 7. ULM-500 型超音波レベル計の特徴

当社の ULM-500 型超音波レベル計は、高ゲインアンプを採用しているため、従来品では困難であったスカムのあるようなポンプ井や汚泥貯留槽など超音波の減衰が大ききところにも使用できます。また、センサには耐食性に優れた耐熱硬質塩化ビニール (PVC) 樹脂を採用し、高い保護等級 (センサ IP67、変換器 IP66) となっているため、厳しい環境下の測定にも適しています。測定は、予め設定したゼロ点距離とセンサから測定面までの距離との差をとることで、設定したスパンに応じた液面レベルを m (mTP, mAP) や % で表示し、外部への出力は 4~20mA の電流出力で行われます。測定方式には、当社独自の信号処理方式を採用しているため、従来のレベル計では困難であった場所への測定を可能としています。

### ①新信号処理方式

従来のレベル計では、センサから放射された超音波パルスが測定面で反射し、そこで得られた受信信号が一定のしきい値を超えた時間を直接検出するため、瞬間的にしきい値を超えてしまうような電氣的ノイズやタンク内の攪拌羽根などからの反射を測定面からの反射として誤認識してしまう場合があります。これに対し本レベル計は、液面からの受信信号のパターンをデジタルデータに変換して記憶させることで、瞬時データのみで判断せず過去のデータも参照し統計処理を行い、尚且つ、受信波形の平均化処理を行っているため、確度の高い測定を可能としています。

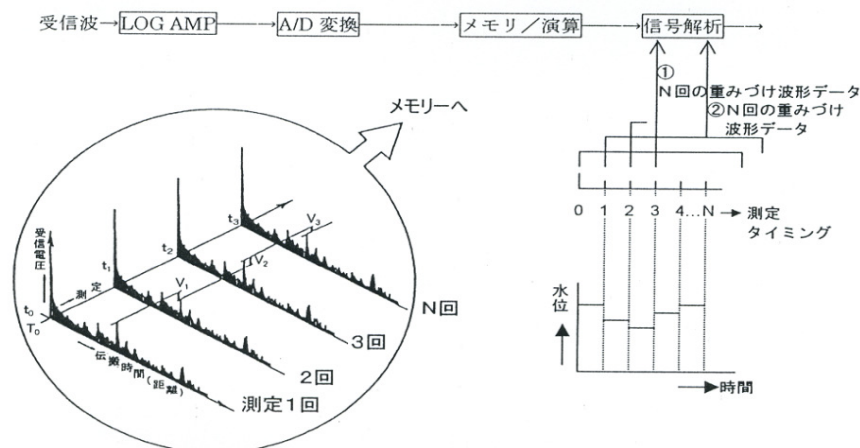


図 3 N回の測定

受信波を LOG 圧縮後に A/D 変換し、CPU に取り込んで信号処理をしています。N 回の平均波形処理や DGL (Dynamic Gain Limit) 機能などにより、波形パターンの特長を見出すことで正しい受信波の検知が可能となります。このような処理により、大きな波立ちなどの変動は圧縮 (平均化) され、瞬間的な変動や間欠な電気ノイズの影響は大幅に減少します。



②固定障害物の影響を受けません。

様々な測定環境下では、センサ自身や取付部の残響、壁の突起やタラップなどの固定障害物からの不要反射、あるいは外部ノイズなどが存在し、これらのノイズ成分は必ずしも一定ではなく、環境や運転状況によって変化します。従来のレベル計では、これらのノイズを検知してしまい、安定して測定することが困難な場合があります。本レベル計では、DGL 機能を採用したことにより、不要反射をノイズパターンとして常に自動学習し、変動するノイズに対してもダイナミックに追従し制限(リミット)することで、ノイズを誤って検知しないようにしています。この機能により、不要反射などのノイズ成分による誤動作を防ぐことができ、また、固定障害物の影響が取り除かれることで狭いスペースでの測定にも優れています。

③多重反射(エコー)の影響を受けません。

多重反射は、センサと測定面を超音波が何回も反射することで発生します。当レベル計は、多重反射も含めた全体の受信波データからソフト処理により第1受信波のみを認識します。

以上の測定アルゴリズムにより、従来品と比較し誤動作は飛躍的になくなり、安定して測定することができます。

8. 測定例

本レベル計では、パソコンから各種設定を行ったり、受信波形をモニタしたりすることができます。測定例として、DGL 機能の動作を実際のモニタ波形で説明します。

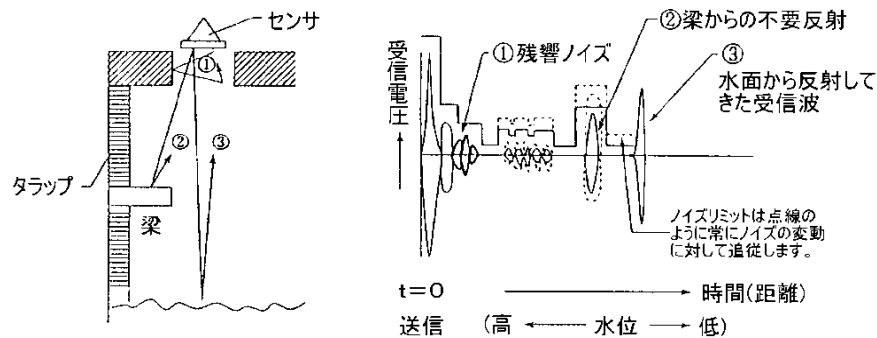


図 4 センサ設置図および送受信波形

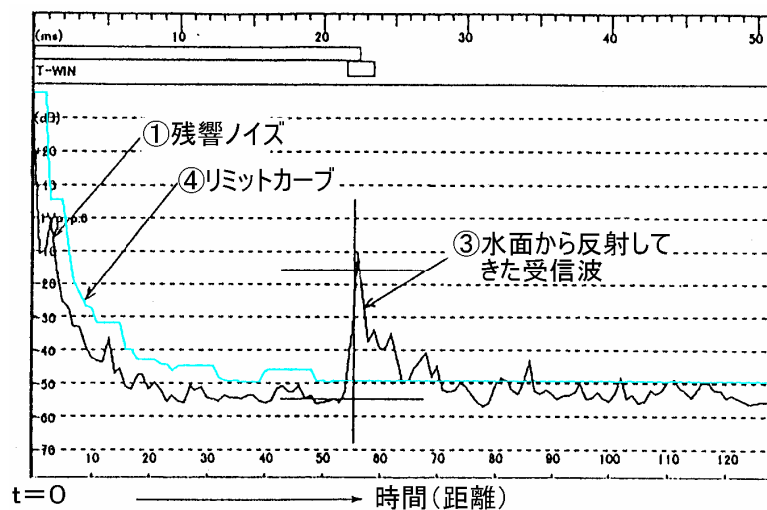


図 5 パソコン波形回析画面

(1) 障害物のほとんどない場所では、図5のような波形が受信されます。リミットカーブ④は、残響ノイズより常に一定幅上にあるよう測定毎にノイズ①の大きさをトレースし、ノイズパターンとして自動学習しているため、リミットカーブ④より下にある波形は検知されません。

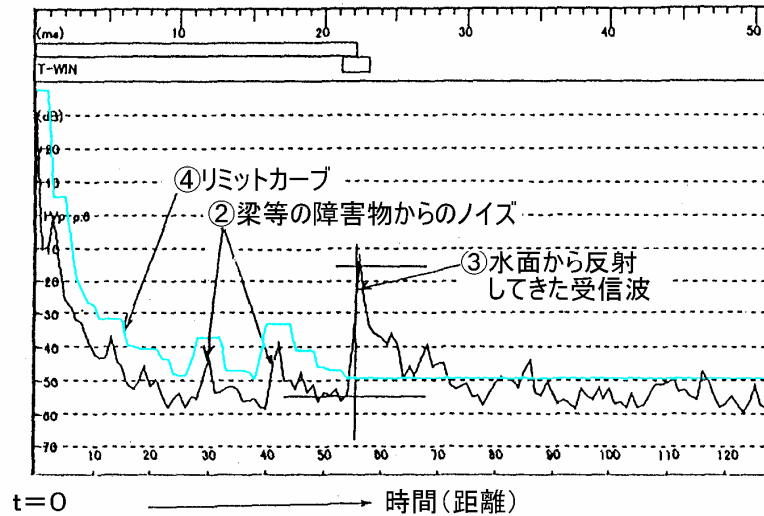


図6 パソコン波形回析画面

(2) リミットカーブは固定されたものでなく、常に反射してきた状況に応じて自動的に制限します。したがって、障害物等からのノイズの大きさが図6の②のように大きくなっても、リミットカーブ④が自動的に②より上にきてノイズを検知しないようにし、水面から反射してきた受信波③を最優先して検出するように働くことで、安定した測定を可能としています。

## 9. 超音波レベル計の応用

### ① 水位差計

変換器1台に対しセンサをn台接続することで、上流下流の水位差をモニタリングできます。例えば河川の取水ゲートなどでは、取水ゲートの内側と外側の水位差をモニタリングすることで、ゲートの開閉を制御したりしています。当社の超音波水位差計では、最大6点まで測定点(センサ)を増設可能です。

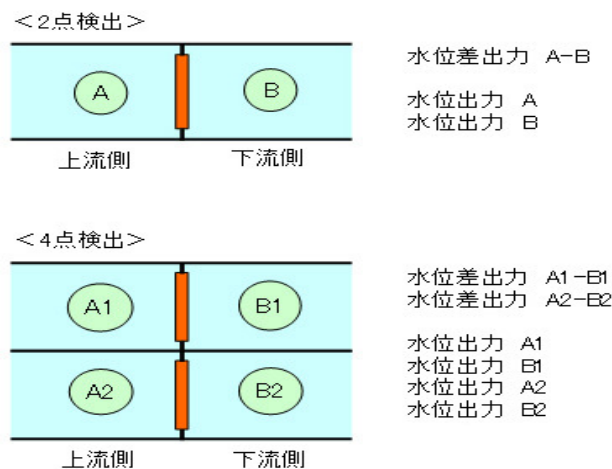


図7 測定点配置例

## ②せき式流量計

せき式流量計は、水路に切欠きを持った仕切板(三角せき, 四角せき, 全幅せき)やフリュームを設置し、上流側の水頭を測定することによって流量を計測するものです。当社のせき式流量計は、流量出力のみならず水頭値も出力し、0.2mm という高分解能にて測定を行うことができます。また、リニアライズ Q-h 曲線は、200 ポイントの近似曲線を内部テーブルに持っているため、高精度の測定を実現しています。

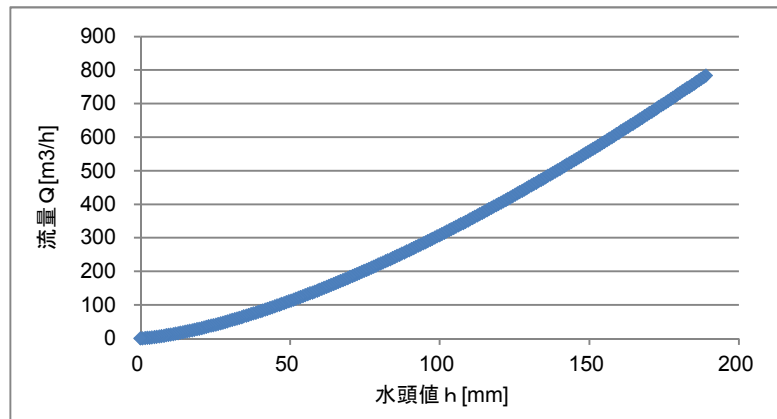


図 8 流量テーブル

## 10. まとめ

レベル計測には多種多様な計測器があり、その中において超音波レベル計は、その使い勝手の良さや優れた耐久性とメンテナンス性により高いコストパフォーマンスを実現し、幅広い用途において高精度で測定できる計測器となっています。また、一度設置すれば、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あることから、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。