

水中音の計測

加藤 洋一

水中音の計測は、図1に示すように、音源である送波器からの音波を受波器で受波して計測する。

水中音の計測における発生する信号Sと雑音Nは、受波器で受波した音源からの音波が信号Sであり、水中で発生する周囲雑音並びに計測系が発生する雑音及び外来から計測系が電磁誘導を受ける雑音の総和が雑音Nである。

雑音Nのレベルが大きいと、信号Sのレベルに影響を与え、信号Sを正しく計測できなくなる。信号Sと雑音Nに対し、正しい計測ができる各々のレベルの比、すなわち、SN比を考慮した計測を行うための留意事項を以下に示す。

- 信号Sは計測系による周波数特性の劣化を極力抑えること。
- 周囲雑音は、場所、季節等の影響を受けるので、事前に計測するか、文献¹⁾等を参照して把握しておくこと。
- 計測系が発生する雑音及び外来から計測系が電磁誘導を受ける雑音は、極力低減し、周囲雑音の最小レベルを増加させないようにすること。ただし、数kHz以上の周波数では、周囲雑音のレベルが急激に減少し、計測系が発生する雑音が支配的になる場合がある。

本稿では、水中の音波を受波器で受波し、電気信号に変換して計測する計測系の構成例と各構成機器の特徴を示す。次に、SN比を考慮した計測系の構築について示す。最後に、計測系が正しく構築されていることを確認するために、SN比を視覚化して把握できるレベルダイヤグラムの作成方法について示す。

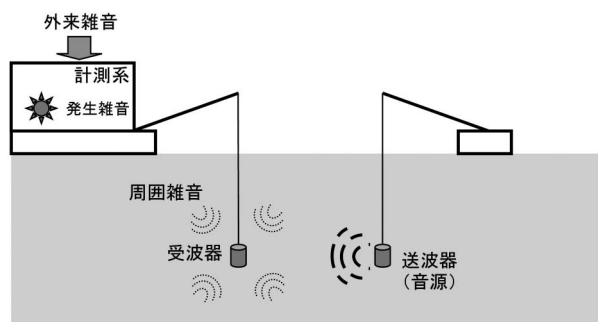


図1 水中音の計測

計測系の構成と特徴

図2に、計測系の構成例を示す。計測系を構成する各構成機器の特徴を以下に示す。

(1) 受波器

- 受信した音波を電圧信号に変換するものである。
- 受信した音波の音圧 p (μPa) に対し、変換した電圧が v (V) であるとき、 $k=20\log(v/p)$ を受波感度といい、単位は (V/ μPa) で示される。
- 受波器は、圧電素子で構成され、電気回路上、コンデンサとして扱うことができる。

(2) 増幅器

- 受波器で発生した電圧を増幅する電子回路である。低周波数域まで損失なく受信するため、入力が高い抵抗値となるように構成する必要がある。
- 扱う信号レベルが大きい場合、周波数が高くなる場合は、高い利得を設定できない。

(3) アンチエイリアシングフィルタ

- A/D変換器で標本化 (Sampling) した際、計測する周波数帯域内で折り返される信号を除去するために標本化周波数の1/2以上の周波数成分を除去する電子回路である。

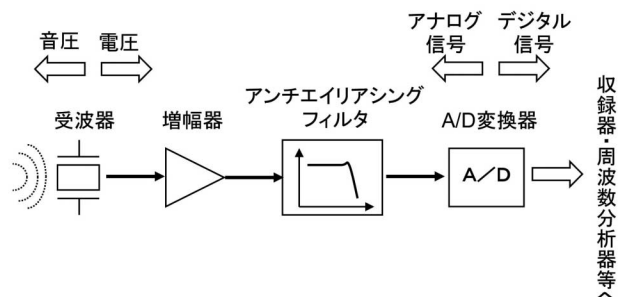


図2 計測系の構成例

(4) A/D変換器

- 計測上限周波数の2倍以上で標準化し、計測に必要なステップ数でデジタル信号に量子化する電子回路である。

SN比を考慮した計測系の構築

計測系の各構成要素に対し、SN比を考慮した計測系を構築するため、信号Sと雑音Nの取り扱いについて述べる。

(1) 増幅器

(a) 信号Sに対する取り扱い

コンデンサと等価な静電容量C (F) の受波器で受波した電圧 v_i (V) を、入力抵抗値R (Ω) の増幅器で受信した場合の入力抵抗間の電圧を v_o (V) とし、等価回路及び周波数に対する v_o/v_i の関係を図3に示す。この特性は高域通過フィルタと同じであり、入力抵抗値R (Ω) を大きくすると、より低い周波数まで特性を平坦にできる。ただし、後で述べる抵抗の熱雑音の影響を考慮する必要がある。

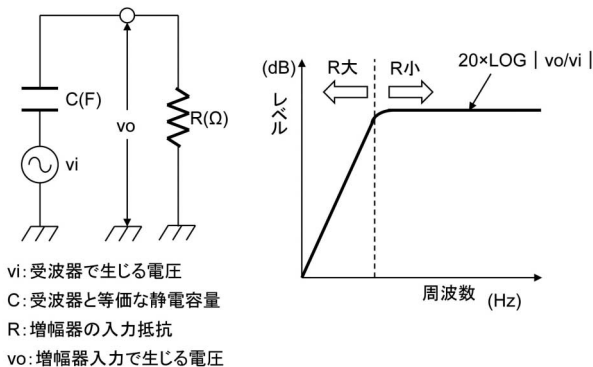


図3 等価回路と周波数特性

次に、増幅器の利得と計測する周波数範囲について述べる。増幅器は安定した動作を得るために、帰還 (Feed Back) をかけて使用する。図4に、計測周波数範囲と帰還量、利得の関係を示す。図中の破線は、帰還をかけない場合の増幅器の周波数特性を示す。帰還量を少なくすると高い利得が設定できるが、計測する周波数範囲で特性が平坦でなく、高い周波数や時間変化の大きい信号を高い利得で増幅すると、入力変化に出力が追従できず、信号は歪んで出力される。このような信号を扱う場合は、低い利得を設定して計測する周波数帯域幅を確保し、増幅器を多段で接続する必要がある。

(b) 雑音Nに対する取り扱い

増幅器の入力抵抗値は、低い周波数まで平坦な特性を確保するために大きくすることを述べたが、抵抗が発生

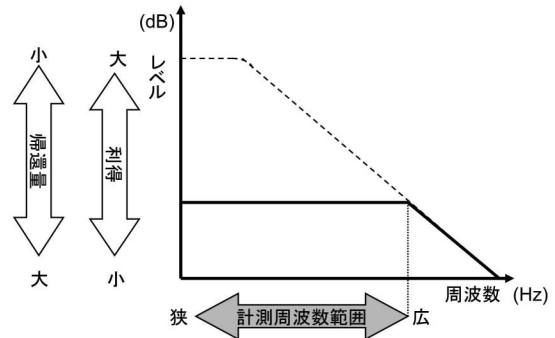


図4 計測周波数範囲と帰還量、利得の関係

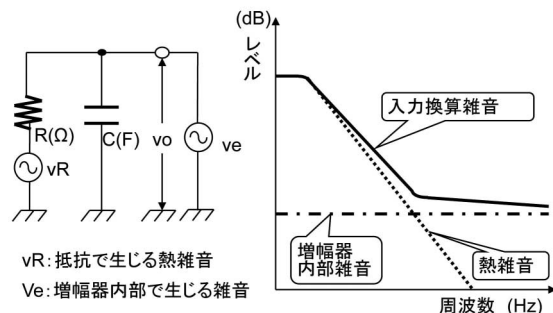


図5 増幅器入力で発生する雑音

する熱雑音の影響を考慮する必要がある。抵抗値を大きくすると、発生する熱雑音も大きくなる。

受波器の静電容量C (F)、入力抵抗R (Ω)、熱雑音 v_R (V)、増幅器入力で発生する電圧を v_o (V) とし、図5に等価回路と周波数に対する v_o/v_R の関係を破線で示す。これは低域通過フィルタと同じ特性であり、周波数が高くなるに従い、増幅器入力で発生する雑音は小さくなる。

これに加え、増幅器内部の電子回路が発生する雑音も考慮する必要がある。増幅器内部で発生する雑音を v_e (V) とし、図5に等価回路と周波数に対する v_o/v_e の関係を一点鎖線で示す。周波数特性は平坦である。

これら二つの雑音源は独立であり、各々を電力加算した値を入力換算雑音といい、周波数特性を図5の実線で示す。入力換算雑音が、水中で受波する信号Sに影響を与えないことが重要である。

(2) アンチエイリアシングフィルタ

図6に、周波数 f_s (Hz) で標準化した信号Sの周波数特性の概形を、標準化前の信号と比較して示す。標準化後の信号は、周波数 $f_s/2$ (Hz) を対称に、元の信号に周波数が高い成分が重なっている。この高い周波数成分が重なることを折り返しといい、信号Sを劣化させる要因となる。標準化前に $f_s/2$ (Hz) 以下の信号成分を通過させ、

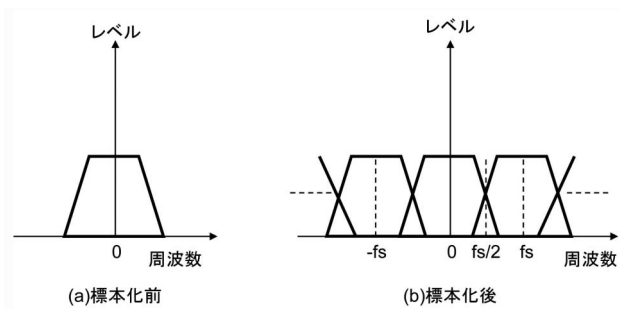


図6 標本化前後の周波数スペクトル

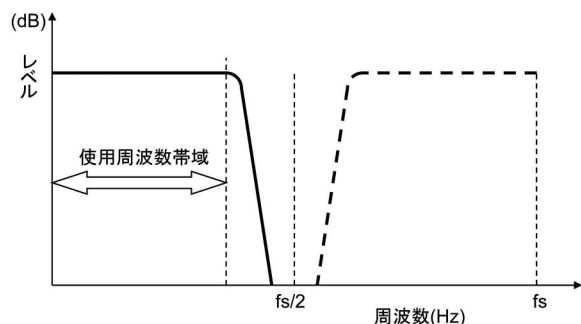


図7 アンチエイリアシングフィルタ

$fs/2$ (Hz) 以上の信号成分を遮断するフィルタを挿入する必要がある。

図7に、アンチエイリアシングフィルタの周波数特性を示す。不要な信号成分を完全に遮断するフィルタは存在せず、傾きを持って信号を減衰させる。フィルタの特性として、傾きを急峻にすると計測する周波数帯域内にレベル偏差が生じる。傾きを緩くすると、標本化周波数 fs (Hz) を高くする必要が生じる。

信号 S だけでなく、雑音 N も標本化前にアンチエイリアシングフィルタを挿入しないと、折り返し雑音が発生する。標本化前の雑音 N が、平坦な周波数特性で、使用する周波数の帯域幅 fb (Hz) ($fb > fs$) を持ち、アンチエイリアシングフィルタを挿入しないで周波数 fs (Hz) で標本化すると、雑音レベルは $10 \log (fb / fs)$ (dB) 増加する。

(3) A/D変換器

(a) 信号 S に対する取り扱い

標本化された信号のアナログ値をデジタル値に変換する量子化 (Quantization) において、変換レンジと変換ビット数を考慮する必要がある。

変換レンジは、A/D変換器に入力できる電圧範囲である。水中音の計測は交流信号を扱うことから、 ± 5 (V) 等、正負の電圧が入力できるものを用いる。入力信号 S の最大ピーク電圧が、変換レンジにできるだけ近い値にな

るように設定することで、計測する信号のダイナミックレンジを広くとることができる。

変換ビット数を設定すると、量子化ステップ数が決まる。変換ビット数を8ビットとすると、量子化ステップ数は $2^8 = 256$ ステップになる。変換ビット数は、多ければ多いほど元のアナログ信号との誤差を小さくすることができる。

現在、よく用いられているA/D変換器は、変換ビット数が16~24ビットであるが、変換レンジを量子化ステップ数で割った値である分解能と精度は必ずしも一致しないことに注意する。分解能とは認識できる最小の変化量であり、精度とはどれだけ基準に近いかを表す指標である。例えば、非常に細かい目盛 (分解能が高い) の物差しを作っても、物差し自体が基準よりずれていれば精度は低いということになる。

(b) 雑音 N に対する取り扱い

量子化を行う際に、量子化誤差による雑音、すなわち量子化雑音が発生する。量子化1ステップ当たりの電圧を q (V) とすると、量子化雑音の実効値 Nq (V_{rms}) は、 $Nq = q / \sqrt{12}$ (V_{rms}) となる²⁾。

これは量子化雑音が $-q/2$ (V) から $q/2$ (V) の間に、平均値が0で一様に分布しているものとし、その標準偏差を求めた結果である。

量子化雑音以外の雑音がないものとし、変換ビット数が n ビットのA/D変換器のダイナミックレンジを求めることができる。ダイナミックレンジとは、識別可能な信号の最大値と最小値の比である。

変換ビット数が n ビットのA/D変換器のダイナミックレンジ DL をデシベルで示すと、

$$DL = 6.02 \times n + 1.76 \text{ (dB)}$$

となる。16ビットのA/D変換器であれば、ダイナミックレンジは98.08 (dB) になる。

レベルダイヤグラムの作成方法

構築した測定系のSN比を視覚化して確認できるものとして、レベルダイヤグラムがある。レベルダイヤグラムの作成例を図8に示し、以下、レベルダイヤグラムの作成方法を述べる。

- 図の上部に、受波器からA/D変換器までの測定系の構成を記載する。併せて、受波感度、増幅器利得、A/D変換レンジ等の設定情報を記載する。
- 図の左端に、音圧レベルをデシベル値 (0 (dB) = 1 (μPa)) とし、スケールを記載する。
- 音圧レベルを示したスケールの横に、受波感度に対応した電圧レベルをデシベル値 (0 (dB) = 1 (V)) と

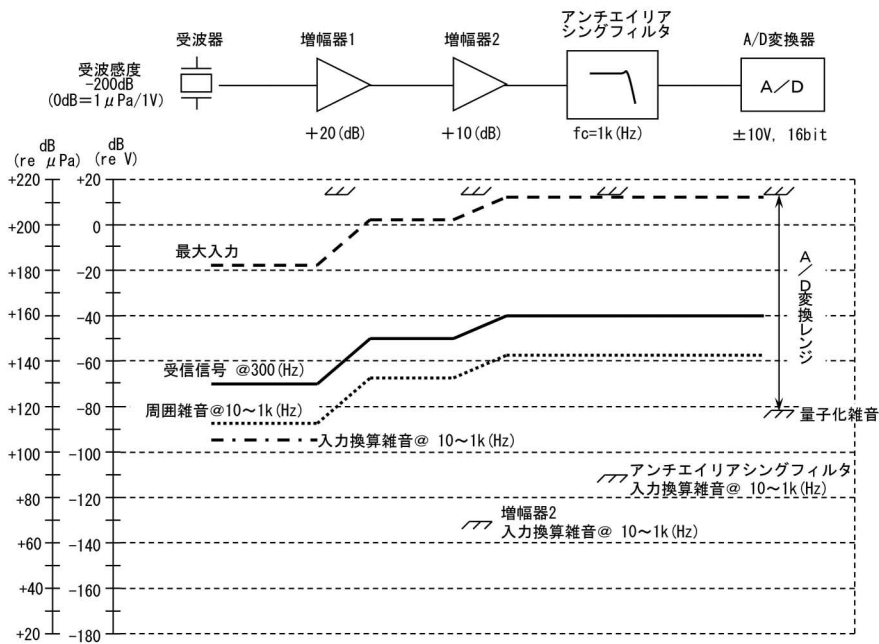


図8 レベルダイヤグラム例

し、スケールを記載する。

- 受波器を除く測定系を構成する各機器の中央部分に、機器が入出力可能な最大レベルを記載する。併せて、機器の最小入力レベルを記載する。増幅器は入力換算雑音、アンチエイリアシングフィルタは自身の雑音の入力換算雑音、A/D変換器は量子化雑音を記載する。
- 受波器—増幅器間に、受信する信号Sのレベル、雑音Nである周囲雑音及び入力換算雑音を記載する。
- 計測系の構成に従い、信号S及び雑音Nのレベル変化を記載する。

レベルダイヤグラム作成後、以下の確認を行う。

- 想定される受信信号の最大レベルが、計測系でサチレーション（飽和）していないことを確認する。
- 計測系で発生する雑音レベルが、想定される周囲雑音の最小レベルに影響を与えないことを確認する。
- 受信時のSN比が、計測系で劣化していないことを確認する。

まとめ

近年、増幅器からA/D変換器、加えて周波数分析器や収録器まで一体となったデータ収集器が世の中に存在する。これらは非常に便利であるが、十分に仕様を把握しないで用いると、計測が失敗する可能性が高い。少々面倒だが、レベルダイヤグラムを作成し、計測目的に合致するかどうかを確認する必要がある。

本稿は、はじめての音響計測（加藤洋一：日本音響学

会誌68巻2号，pp.86–91，2012年2月）に加筆、修正したものである。◆◆

参考文献

- 1) R.J.Urick 著：土屋明 訳，西村実 監修，水中音響の原理，共立出版，Chap.7，pp.200–206，1978年
- 2) ATTベル研究所：山口開生，中込雪男 監訳，情報通信システム 第4章，丸善，pp.60–62，1984年

筆者紹介

加藤洋一：社会システム事業本部 ディフェンスシステム事業部 技術第一部