

# AEセンサの種類と特性

振動を計測するには、空間にある基準静止系を設けてその点から被測定物の変位量を計測する非接触法と、センサを直接被測定物に取り付けて測定する接触法の2通りがある。振動体がセンサの質量により影響を受けるほど軽かったり、非常に高温でセンサを直接取り

付けることができない場合を除いて、一般的には手軽であるという実用上の理由から接触法が用いられる。

AEセンサも接触法により材料中の弾性波を捕らえる。以下にAEセンサの特性や使用方法等について具体的に述べる。

## 1. 弾性波

AE信号は固体中を伝わる弾性波であり、縦波(p波)、横波(s波)、表面波(r波)等が存在する。各々の音速はおおむね以下のような関係にある。

$$p波 : s波 = 1 : 0.6$$

$$s波 : r波 = 1 : 0.9$$

地震のとき経験するたて揺れ、横揺れは、この音速の違いから発生する。たて揺れはp波によるもので、音速が速いため真先に到達する。横揺れはおもに表面波によるもので、境界の片側面が空中のため減衰が少なく、従って揺れが大きい。

AEの場合は地震と違って伝播距離が短いため、p波とs波が完全に分離することはほとんど無く、重なるように到達する。

音響インピーダンスの異なる媒体境界面で、モード変換、反射、透過等の現象が生じる。音響インピーダンス(Z)は次の式で求まる。

$$Z = \rho \cdot c$$

$\rho$ : 密度(kg/cm<sup>3</sup>)

$c$ : 音速(m/s)

音響インピーダンスがそれぞれZ1とZ2の媒体境界面で弾性波が反射する割合kは、以下のようになる。

$$k = (Z1 - Z2) / (Z1 + Z2)$$

Z1 = Z2の時反射はゼロになり、Z1 >> Z2 または Z1 << Z2の時すべての波が反射することが分かる。気体は固体や液体に比べて密度(比重)が圧倒的に小さいため、音響インピーダンスも数桁小さい。AE信号をうまく検出するためには、受波面に気体を介在させないことが肝要である。

ちなみにAEセンサを取り付けるときにグリス等のカプラを使うのは、音響インピーダンスをなるべく同じにし、弾性波を受波面で反射させずに透過させるためである。

表2-1 音速と5MHzのときの波長(代表値)

物質	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	縦波		横波	
		C <sub>L</sub> (m/s)	$\lambda$ (mm)	C <sub>s</sub> (m/s)	$\lambda$ (mm)
アルミニウム	2.70	6260	1.25	3080	0.62
銅	7.80	5900	1.18	3230	0.65
アクリル樹脂	1.18	2730	0.55	1430	0.29
グリセリン	1.26	1920	0.38	液体や気体には横波はない。	
水 (20℃)	1.00	1480	0.30		
油	0.92	1390	0.28		
空気	0.0012	340	0.07		

## 2. 圧電効果

水晶やロッシェル塩、チタン酸ジルコン酸鉛磁器(PZT)等の結晶は、圧力、張力、せん断力を受けてひずみを生じると、誘電分極を発生し、電界を生じる(正効果)。逆に結晶に電界を加え分極を起こさせると、結晶はひずみを生じる(逆効果)。この現象を圧電効果と呼ぶ。

図2-1のように電界の方向と応力(T)の方向が垂直な場合を横効果(a)、平行な場合をたて効果(b)、電界方向に垂直または平行な面内のずれの場合をせん断効果(c)と呼ぶ。AEセンサは主にたて効果を利用している。

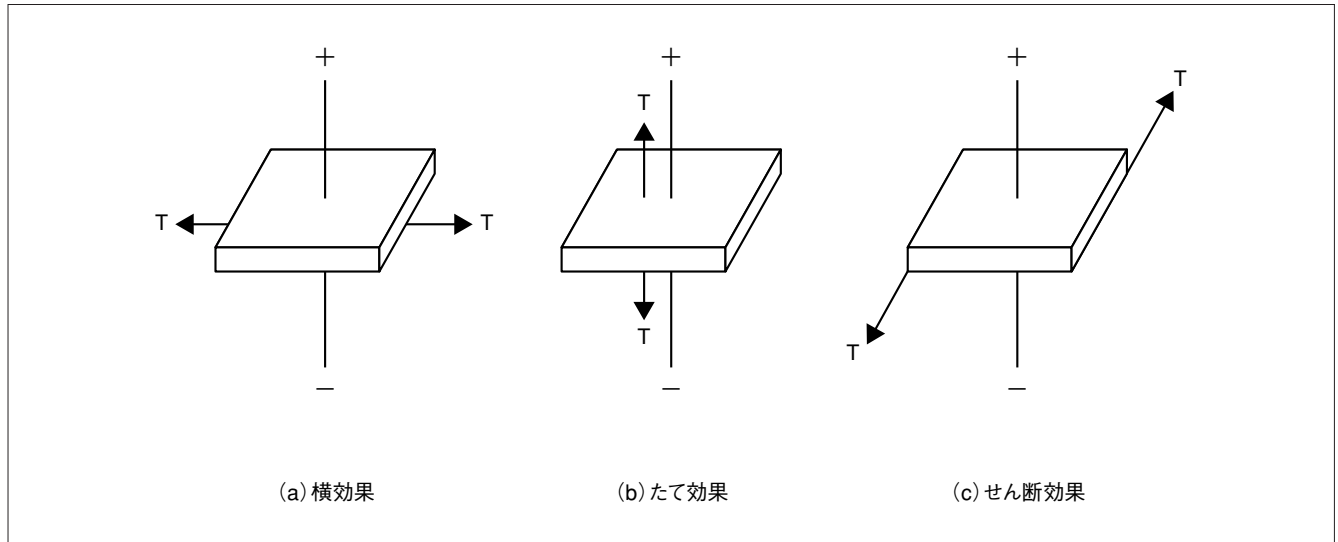


図2-1 圧電効果

## 3. 原理

AEセンサはどのような物理量に応答しているのか？主に速度に応答している。AEセンサの絶対感度校正の縦軸が速度で記載されているのはこのためである。

AEセンサと加速度センサの大きな違いは、圧電素子の上のおもりの有無である。加速度センサはおもりによりダンピングを行い、共振周波数を下げている。加速度センサの等価回路は図2-2(a)に示すようにおもり $m$ 、バネ $k$ 、ダンパ $d$ を用いて表わされる。センサ内でエネルギーを消費しないと仮定すれば $d$ は省略される

から、等価回路は(b)のようになる。このような系は共振周波数より低い周波数領域では加速度に、共振周波数では速度に、共振周波数より高い領域では変位に応答する。加速度センサは共振周波数以下の加速度領域のみを利用する。

AEセンサにはおもりが無いため、共振周波数は高くなる。微少な信号を検出するために共振点を積極的に利用する。従ってAEセンサの主成分は速度に応答していることになる。

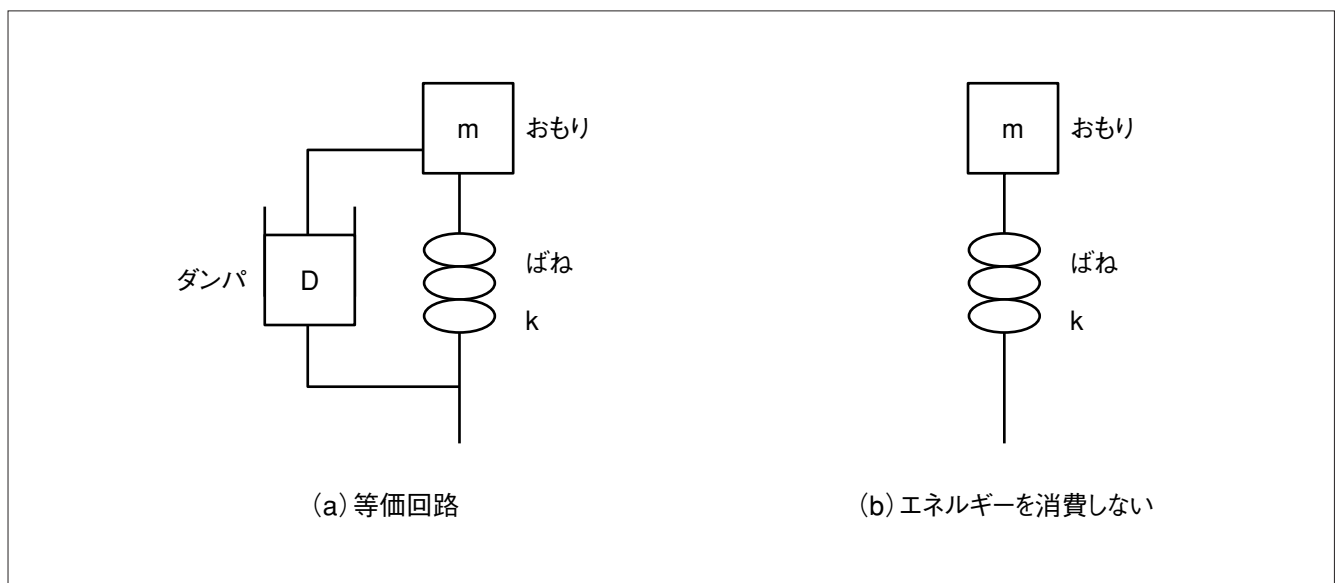


図2-2 センサの等価回路

## 4. 感度

AEセンサの感度は、速度 ( V/(m/s) ) または比 (dB) で表わされる。

一般的にAEセンサの感度は、その外形寸法が小さくなるほど悪くなる。従って設置空間の制約により、小さいセンサを使わざるを得ない場合は、感度の低下を覚悟しなければならない。

また、高温用としてPZT以外の結晶を使った場合も感度は著しく低下する。ちなみにPZTの感度に比べてニオブ鉛 (300℃まで測定可能) では約1/10、ニオブ酸リチウムの単結晶 (450℃まで測定可能) では約1/100にまで低下する。ウェーブガイドを用いたときの減衰は1/3~1/10といわれているので、高温用にはウェーブガイドを使用したほうが良い。

AEセンサの感度と出力電圧から、AEによる物体表面の振動振幅を推定してみよう。例えば当社のAE-900Fというタイプの広帯域センサの感度は、200kHz~1MHzの範囲でほぼ50dBV、すなわち約

300V/(m/s)である。このセンサで500kHzの信号が10mV検出された場合の振動速度 $v$ は、

$$v = 10 \text{ (mV)} / 300 \text{ (V/(m/s))} = 33 \mu\text{m/s}$$

となる。従って物体表面の振動振幅 $L$ は、

$$L = 33(\mu\text{m}) / 2\pi \times 500 \text{ (kHz)} = 0.01\text{nm} (= 0.1 \text{ \AA})$$

となる。金属の原子間距離が数オングストローム (Al = 2.8Å, Fe = 2.5Å等々) であることを思えば、きわめて微小な振幅である。しかもAEセンサの出力で10mVの信号が検出されるのは、相当大的な割れが発生したような時に限られ、通常の方法試験等で検出されるのは、この1/10~1/100程度である。いかにAEセンサの感度が高いかが分かる。

なお、AEによる振動の振幅が1Åよりはるかに小さいことは、ガラスの熱衝撃による破壊時に発生するAEを、レーザを用いて測定した結果からも確認されている。

## 5. 感度の校正法

AEセンサの校正法には相互校正法、接触法、シャープペンシル芯圧折法等がある。

### (1) 相互校正法 (現在実施している校正法)

音響機器で従来から行われてきた手法を応用したもので、圧電素子の可逆性 (正効果と負効果、すなわちマイクroフォンはスピーカにもなること) を利用する。棒状の媒体 (ただし反射波の影響を除去するために、直径のほうが長さより大きい) を伝わる縦波に対する感度を求める。

校正を行うセンサを3個用意し、この中から任意の2個のセンサを伝播媒体に取り付けて、送受信系を構成する。この時の駆動電圧、受信電圧、センサのインピーダンスを測定する。他の2通りの組み合わせも同

様に測定すると、感度は計算で求まる。

相互校正法は絶対感度校正であり、速度に対する感度 (V/(m/s) ) が求まる。

反射の影響を除去するために、駆動波形はコサイン2乗で振幅変調されたバースト波形を使う。反射波が壁面にぶつかってセンサに到達する前に、バースト波の測定を完了する。バースト波には最低でも2波程度は含ませる必要があるが、周波数が低くなるとバースト時間が長くなり、反射波と混ざってしまうので、数十kHz以下の低周波は測定できない。

1V/(m/s) の感度 (1m/sの速度で1Vを出力) を0dBとし、dBで表わす。標準的なAEセンサの感度は50dB~70dBである。

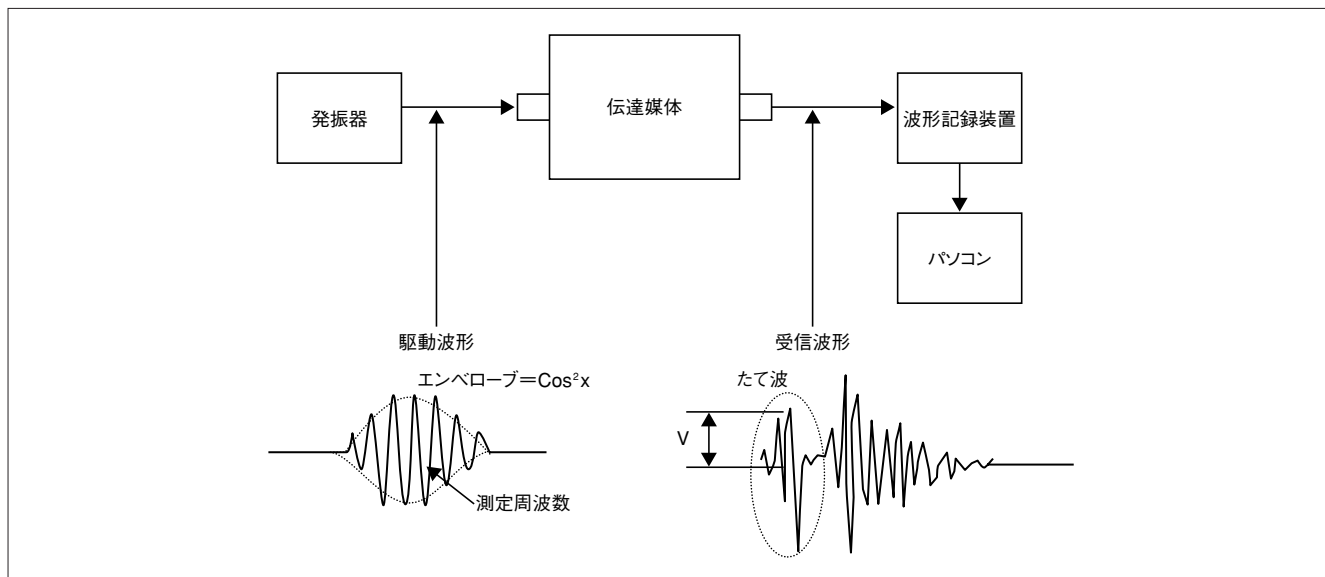


図2-3 相互校正法

## (2) 接触法（過去に実施していた校正法）

図2-4のように比較的広帯域な特性を持つ基準器に校正すべきセンサを密着させ、基準器に加えた電圧とセンサ出力電圧の比をdBで表わす。このデータには基準器の特性も含まれてしまい、かつ物理量との対応ができないというデメリットがあるが、2つ以上のセンサの特性を比較するには、もっとも簡単な方法である。

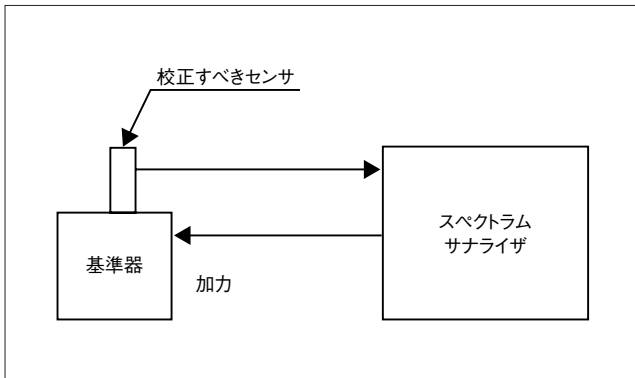


図2-4 接触法

## (3) シャープペンシル芯折法

AEセンサを通常の測定状態に取り付け、その近傍でシャープペンシルの芯を圧折する。硬度2H、径0.5mmの芯を長さ3mm出し、約30度の角度で圧折する（このための治具を図2-5に示す）と、そこで開放される応力は1 $\mu$ sの間に5ニュートンになる。これを基準として計測器の感度を調整したり、得られたデータの物理量を推定する。

他の方法に比べて簡便であり、かつ実際の測定状態で検証ができるのが特長であるが、圧折の度に検出波形がばらつく欠点もある。

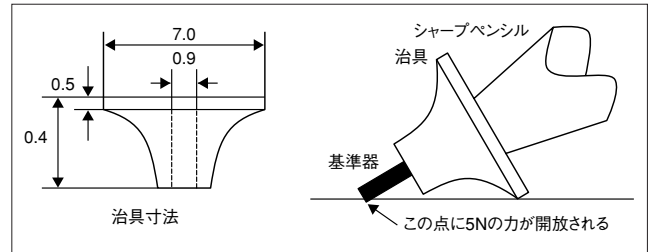


図2-5 シャープペンシル芯折法

## 6. 構造

AEセンサの構造例を図2-6に示す。(a)は一般的な不平衡型、(b)は平衡型、(c)はプリアンプ内蔵型である。PZT（チタン酸ジルコン酸鉛磁器）の出力インピーダンスは高いので、外来の雑音が混入しないよう

に金属製のケースでシールドされている。

AE信号は受波面を介してPZTに伝達され、電気信号に変換される。

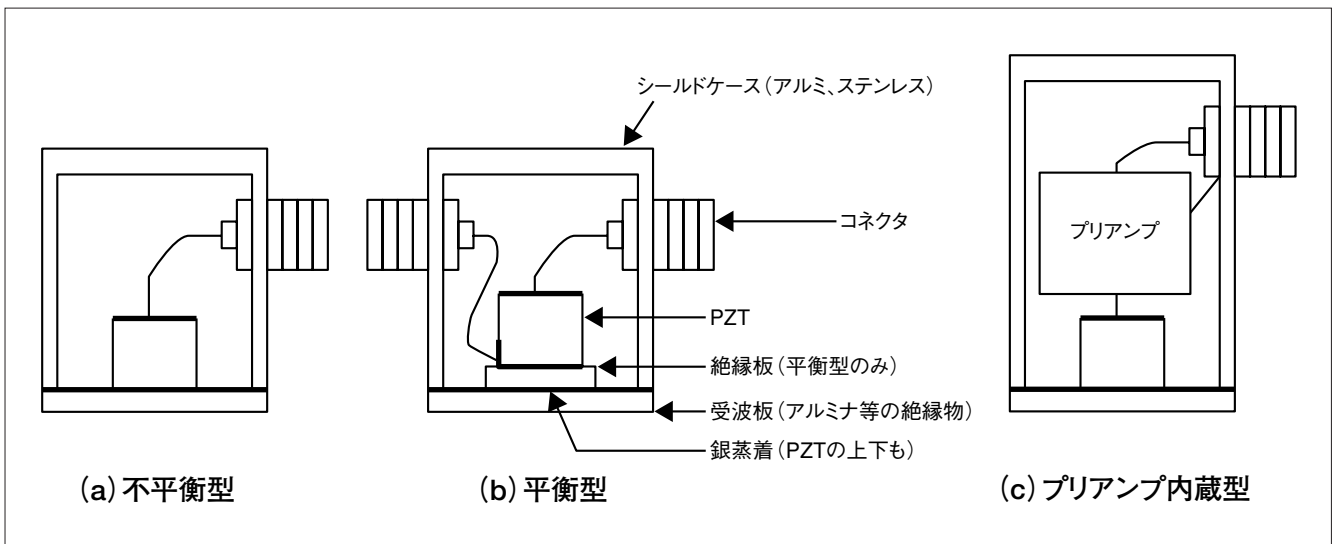


図2-6 AEセンサの構造例

## 7. AEセンサの種類

### ■7-1. 平衡型と不平衡型

一般には不平衡型のセンサを使う。

不平衡型は圧電素子の負極側がシステムのコモンに接続されているが、平衡型では、負極側は信号のひとつとして扱われる。平衡型センサは差動型プリアンプと組み合わせて使用し、差動型プリアンプは、正極電

圧と負極電圧の差分を増幅する。

平衡型センサを使用するメリットは、原理的にはセンサープリアンプ間に混入する雑音をキャンセルできる点にあるが、実際にはケーブルの+/-でインピーダンスが異なるため、雑音は等量には混入せず、従って相殺効果が少ない場合が多い。

## ■7-2. プリアンプ内蔵センサ

センサケースの中にプリアンプを封入したもので、圧電素子（PZT）とプリアンプの間に混入する雑音をほぼ完全に遮断することができる。センサケースがやや大きくなること、急峻なフィルタを内蔵できないこと、高価であること（破損した場合はプリアンプも廃棄となる）等のデメリットがあるが、センサから最大数百m離れた計測装置に直接接続できることから、設備診断や土木関連を中心に使用されている。

表2-2 防水ランク

防水ランク	規格 JIS C0920-1982	内 容	備考
I	IPX2	鉛直から落ちてくる水滴によって有害な影響がない	
II	IPX6	いかなる方向からの水の噴流を受けても内部に水が入らない	
III	IPX7	定められた条件下で水中に没しても内部に水が入らない	水面下 15cm
IV	IPX8	指定圧力の水中に常時没しても使用できる（6kg/cm <sup>2</sup> 耐圧）	

## ■7-3. 防水型センサ

防水型センサは主に屋外で使用するときに使用する。通常型より一回り大きくなる。ケーブルは直出しで、ケーブルの長さは購入時に指定することもできる。

当社の防水型センサは、I～IVまでの防水ランクがある。特に指定しない場合はランクⅢで製作する。

表2-3 防油ランク

防油ランク	規格 JIS C0920-1982	内 容	備考
I	防滴Ⅰ型に準ずる (保護等級1)	鉛直から落ちてくる油滴によって有害な影響がない	
II	防沫型に準ずる (保護等級4)	いかなる方向からの油の飛沫を受けても有害な影響がない	
III	防水型に準ずる (保護等級6)	いかなる方向からの油の噴流を受けても内部に油が入らない	
IV	防浸型に準ずる (保護等級7)	定められた条件下で油中に没しても内部に油が入らない	油面下 15cm

## ■7-4. 防油型センサ

防油型センサは主に工作機械への応用や設備診断等、油がかかる場合に使用する。通常型より一回り大きくなる。ケーブルは直出しで、ケーブルの長さは購入時に指定することもできる。防水型とのおもな違いは耐油ケーブルを使用していることである。従って同じ規格の防油センサを防水センサの代わりに使用することは可能だが、その逆はできない。

当社の防油型センサは、I～IVまでの防油ランクがある。特に指定しない場合はランクⅡで製作する。

## ■7-5. 絶縁型センサ

### (1) 取り付け面絶縁

一般のセンサは圧電素子の負極側がケースに接続されているが、受波面が絶縁物（アルミナ）なので、被測定物に取り付けても電氣的に接地されることはない。

しかしながら、高周波的には容量を介して接地されることになるし、センサホルダを用いればホルダを介して接地されることになる。

### (2) 2重ケース絶縁

防水性が問題になったり、センサ全体を地中に埋めるような場合には、取り付け面絶縁では絶縁が不十分である。2重ケース絶縁では、センサケースを内ケースと外ケースに分けることにより、完全に絶縁する。副次的に防水（または防油）構造になる。

プリアンプ内蔵センサで、センサケーブルを数百mにわたって引き延ばす場合は、グラウンドループによる雑音の影響が顕著になるので、センサは必ず絶縁する必要がある。

### (3) 非絶縁

対象物が完全絶縁体であったり、タッチセンサのように信号レベルが大きくグラウンドループによる雑音が無視できるような場合は、非絶縁センサが使用できる。受波面を含めて完全に金属で覆われるので強度的に強く、接着剤を使っても、溶剤で溶かしてセンサを外すことができる。また、加速度センサのように受波面にネジを切ることもできる。

## ■7-6. 高温用センサ

被測定物が80℃～200℃の場合は、高温用センサを直接取り付けることができる。さらに高温用にはPZT以外の結晶を用いることもできるが、感度が極端に低下するので、ウェーブガイドを使用することを推奨する。



## 8. ウェーブガイド

導波棒とも呼ばれる。

### (1) 高温での応用

被測定物が高温で直接センサを取付けられない場合に、ウェーブガイドを介してAE信号を検出する。表面温度が数百℃の場合は、直径3～5mm、長さ0.3m～1mのステンレス棒の一端を円錐状にして、高温表面に圧接し、他端にAEセンサを取付ける。ウェーブガイドの長さは、表面温度が室温まで下がるのに必要な長さにする。ウェーブガイドの保持方法には、マグネットホルダ、専用治具、溶接等の方法があるが、一長一短である。

さらに高温の場合は、直径10～30mmのセラミックスのウェーブガイドを使用する。

### (2) 土木での応用

AE波は岩盤や地盤を伝わりにくい。少しでも監視領域を広げるために、耳たぶの機能として金属製のウェーブガイドを用いる。例えばセンサの周囲1mしか検出できない岩盤で、センサの先に5mの金属製のウェーブガイドを取付けて垂直に埋めると、岩盤表面の監視領域は周囲1mだが、深さ方向は約5mに広がる。これは、金属がAEを伝え易い性質を利用している。

また、変形時に音を出し易い材料でウェーブガイドを作り、ウェーブガイドが発生する音を積極的に利用する方法もある。例えば、斜面にこのウェーブガイドを埋めておき、土砂崩壊等の前兆として斜面が動き始めると、ウェーブガイドに応力が加わり音が発生する。この音をガイドに取付けたAEセンサで検出する。

## 9. センサケーブル

センサケーブル(センサとプリアンプ間のケーブル)は、極力短くすることが望ましい。長くすると、以下の2つのデメリットを生じる。

### (1) 外来の電気雑音を拾い易くなる。

シールドケーブルを使用しても、雑音は完全には除去できない。

### (2) ケーブルの容量により、信号の減衰が大きくなる。

センサケーブルは通常100pF/m程度の容量があ

り、センサの出力容量は100～300pF程度である。仮に100pFのセンサにケーブルを1m接続すると、信号は1/2になる。

また、センサケーブルとして通常の同軸ケーブルを使用すると、ケーブルを曲げたり揺すったりしたときに雑音を発生する(トリボ効果)。専用のローノイズケーブルを使う必要がある。ただしプリアンプ内蔵センサではこの必要はない。

## 10. 接地

地面には大きな雑音電流が流れている。センサを接地すると、この雑音電流の影響を受ける。従って接地は計測器側で行い、センサは電気的に大地から絶縁す

る。特に岩盤やコンクリート構造物の測定のように、ケーブルが長くなる(100m以上)場合には、雑音電流による影響が大きくなるから、絶縁は必須である。

