

■1 群 (信号・システム) - 10 編 (超音波信号処理)

---

4 章 超音波計測

## ■1群 - 10編 - 4章

### 4-1 超音波による計測の概要

(執筆著：山中一司) [2009年7月 受領]

#### 4-1-1 はじめに

超音波計測技術は、測定技術、映像法、非破壊評価などからなり、送受信器、測定装置（音速・減衰・弾性定数ほか）、弾性表面波、ガイド波、伝搬現象（分散・回折・集束ほか）、界面現象（反射・屈折・透過・散乱）、非線形、位相共役、フェーズドアレイ、コンピュータグラフィ、超音波顕微鏡、共鳴、AE（アコースティックエミッション）、レーザ超音波、電磁超音波、空中超音波などの技術項目がある。適用分野としては温度計測、欠陥・損傷評価、構造健全性診断、環境計測など多岐にわたる。

本章では、超音波計測の最近の重要項目についてまとめる。

最近、微小電気機械システムがマイクロからナノオーダーへとスケールダウンが進み、材料や素子のナノ領域の評価が重要になってきた。ここで表面下を覗く超音波計測が有利である。そこで本節では、この計測のために開発された音響力顕微鏡と総称される方法を紹介し、微小素子の電極剥離の評価への応用を示す。第2節以降は、環境計測、弾性表面波応用及び非破壊検査などの重要項目について概説する。

#### 4-1-2 音響力顕微鏡

音響力顕微鏡とは、探針と試料の接近により流れるトンネル電流を一定にすることで凹凸像を得る走査型トンネル顕微鏡<sup>1)</sup>と超音波計測を結びつける微小領域の音響特性計測法の総称である。最初の試みとして、超音波探針顕微鏡（Scanning ultrasonic tip microscope : SUTM）<sup>2)</sup>やトンネル音響顕微鏡（Tunneling acoustic microscope : TAM）<sup>3)</sup>がある。これらはSTMの剛性の高い探針を振動させて、探針と試料の接触弾性（力の距離依存性）に依存する振動振幅から試料の音響像を得た。しかし、凹凸像を同時に得る手段をもたなかったため、距離を一定にする機能がなく、映像の解釈が容易でないという問題があった。これに対して、原子間力顕微鏡（Atomic force microscopy : AFM）をベースとした力変調（Force modulation : FM）法<sup>4)</sup>（図4・1(a)）、超音波力顕微鏡（ultrasonic force microscope : UFM）<sup>5)</sup>（同図(b)）、超音波原子間力顕微鏡（Ultrasonic atomic force microscope : UAFM）<sup>6)</sup>（図4・2）及び原子間力音響顕微鏡（Atomic force acoustic microscopy : AFAM）<sup>7)</sup>では、剛性の低いカンチレバー先端の探針を試料に接触させたままカンチレバーを振動させ、カンチレバーの時間平均変位と振動振幅を独立に計測するため、前者から距離（凹凸像）後者から弾性映像を同時かつ独立に取得できる。このため、AFMの普及とともに一般的な方法として広がってきた。

金属やセラミックスでは、試料と探針の弾性率及び接触半径によって与えられるバネ定数の次元をもつ接触弾性 $s$ がカンチレバーのバネ定数（剛性） $k$ より顕しく大きく、常に $s \gg k$ であり、接触弾性 $s$ または相対接触弾性 $s/k$ が少し変化してもカンチレバーの共振周波数 $\omega_R$ はほとんど変化しない。したがって、 $\omega_R$ の測定値から接触弾性を評価する方法の精度は低い。しかしだからといって、バネ定数の大きいカンチレバーを用いると接触力の制御精度が低下し、試料を傷つけ、高精度な凹凸像が得られない。

## 原子間力顕微鏡におけるDC応答 ナノスケールの欠陥評価

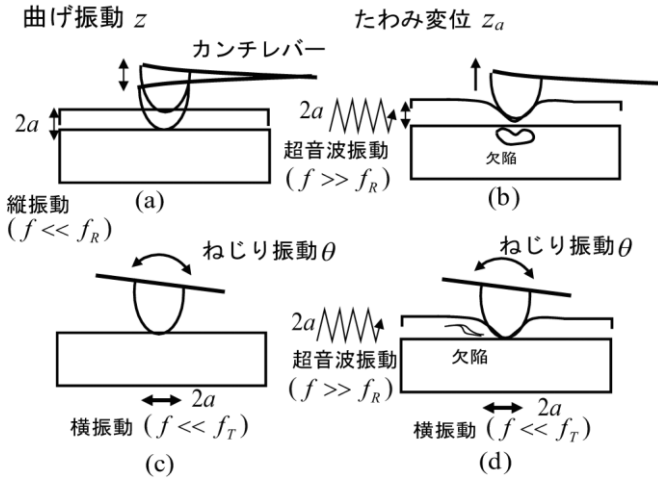


図 4・1 1 初期の音響力顕微鏡の原理

(a) 力変調法 (b) 超音波力顕微鏡 (c) 横振動モード AFM (d) 横振動モード超音波力顕微鏡

このように高精度な形状測定と弾性測定は相反する要求であった。このジレンマを解決する方法として登場したのが、図 4・1(b)に示す超音波力顕微鏡である<sup>6)</sup>。ここでは、試料をカンチレバーの共振周波数より十分高い周波数で振動させる。すると、カンチレバーは自身の慣性のため試料の振動に追従できず、試料が上昇すると探針が試料に押し込まれる。これは本来柔らかいカンチレバーでも慣性による硬化 (stiffening) 現象である。この際、1 周期にわたって接触力を積分すると上向きの力になるため、カンチレバーが上方に直流的 (direct current : DC) に変位し、この変位は相対接触弾性に依存することが示された<sup>6)</sup>。UFM は市販の原子間力顕微鏡に圧電振動子を取りつけ、振幅変調の復調信号の振幅をロックイン増幅器で測定するだけで実現できるため、世界各国で広く普及した。

しかし、 $z_a$  は試料の超音波振動の振幅  $a$  に比例せず、接触力に依存する一定のしきい値  $a$  で立ち上がる非線形応答であり、定量的解析は容易でない。そこで、慣性硬化現象を利用する点で UFM と共通だが、線形の解析で試料の接触弾性を評価できる UA-FM<sup>7)</sup> が開発された。なおほぼ同時期に開発された AFAM<sup>8)</sup> も、同様な慣性硬化現象をもつことが分かり、同様に普及の動きを見せている。UA-FM はカンチレバー駆動方式であり、AFAM は UFM を土台に開発されたため、試料駆動方式を取る点が相違点である。最近では、原子間力顕微鏡のカンチレバーではなく、Q 値の高い圧電共振子に直接針を取り付ける方式の音響力顕微鏡も提案されている。

## 超音波原子間力顕微鏡によるナノ組織評価

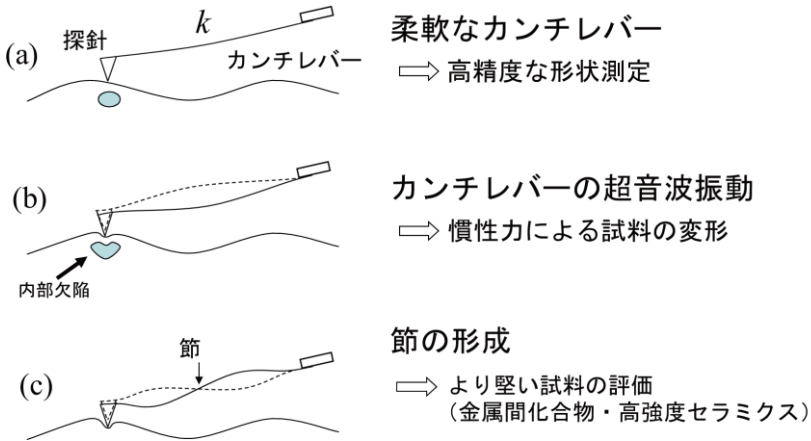


図 4・2 AFM による力学特性計測法

- (a) 原子間力顕微鏡 (AFM) における形状計測
- (b) 基本モード UAFM における弾性特性計測
- (c) 高次モード UAFM における弾性特性計測

図 4・2(b)は、UAFM の原理を表す。カンチレバーの共振時には UFM の場合と同様に慣性力を受けるので、探針が試料を変形させることができる<sup>7)</sup>。(c)は 2 次の共振モードを示す。(b)に示す基本 (1 次) 共振モードより高い周波数の振動が検出できる<sup>9)</sup>。また、節の形成によりカンチレバーの実効長が減少するのでバネ定数が増加し、弾性変形能力が一層向上する。このことは、基本的な力学解析により定量的に示されている。カンチレバーの共振周波数  $\omega_R$  は、相対接触弾性  $s/k$  により変化する。そこで、カンチレバーを共振周波数近傍の周波数で駆動し、その振幅をロックイン増幅器で計測することによって、接触弾性を反映した振動振幅像を得る。また、図 4・3 に示すように、共振周波数の近傍で振動の位相が大きく変化する。そこで電圧制御発振器 (voltage controlled oscillator : VCO) を用い、カンチレバー振動の位相が一定になるように VCO の発振周波数を制御すると、カンチレバーは常に共振周波数で振動するので、共振周波数の迅速測定が可能になる<sup>9)</sup>。また、共振周波数と共振スペクトルの幅の比で、共振の鋭さを表す目安であるとともに、試料の粘性などによるエネルギー損失の少なさを表す Q 値は、粘性を反映する。一般に共振時の振幅は Q 値に比例するので、共振時の振幅を測定すると Q 値のマッピングを表す像が得られる。

### 共振周波数トラッキング型UAFM

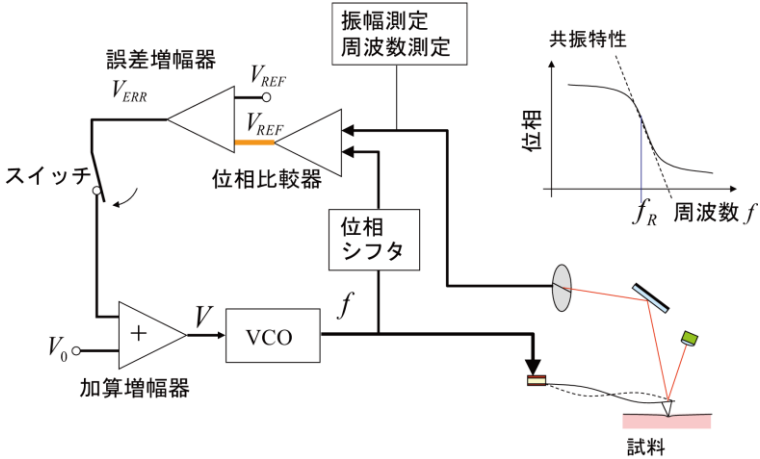


図 4・3 共振周波数・Q 値マッピング型 UAFM

#### 4-1-3 マイクロデバイスの電極の評価

音響力顕微鏡では表面下の構造が観察できる。これまで、UFM<sup>6)</sup> や UAFM<sup>9,10)</sup> により層状結晶であるグラファイトや 2 硫化モリブデン結晶内部の転位及びその特異な可逆的変形挙動の観察が行われた。また、より工学的な応用として電子デバイスのサブミクロン厚さの金属膜の剥離検査への応用がある。

図 4・4 はマイクロデバイスの Cr 電極の端部の観察結果である。(a)は電極端部の AFM 凹凸像の 3 次元表示である。電極の厚さは約 240 nm だった。

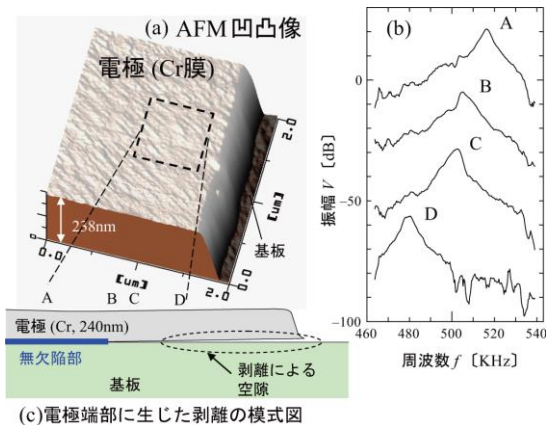


図 4・4 マイクロデバイスの電極の剥離欠陥

(a)の点線で囲んだ領域内の位置 A-D で、荷重 660 nN において測定したたわみ 2 次共振スペクトルを(b)に示す。共振周波数が A から D に向かい徐々に低下していた。これは(c)に示した模式図のように、接触弾性を低下させる剥離の存在を示唆する。剥離をモデル化して行った有限要素法解析により、剥離部の変形がこの変化を説明できることが分かった。また、位置 B 及び C では(b)のスペクトル形状がピーク周波数に関して非対称だった。これは剥離空隙が振動により間歇的に閉じる接触振動が発生して、接触弾性に非線形性が生じたためと考えられる。このように UAFM ではサブミクロンの深さに存在する剥離欠陥の映像化が可能だけでなく、共振スペクトルの測定により剥離の界面状態も評価できる可能性があることが分かった。

#### ■参考文献

- 1) G. Binnig, C.F. Quate and Ch. Gerber, Phys. Rev. Lett. vol.56, 930, 1986.
- 2) K. Uozumi and K. Yamamuro, Jpn. J. Appl. Phys. vol.27, L1297, 1989.
- 3) K. Takata, T. Hasegawa, S. Hosaka, S. Hosoki and T. Komoda, Appl. Phys. Lett., vol.55, 1718, 1989.
- 4) P. Maivald, H.J. Butt, S.A.C. Gould, B. Drake, J.A. Gurley, V.B. Elings, P. K. Hansma, Nanotechnology, 2, 103, 1991.
- 5) K. Yamanaka, H. Ogiso, O. Kolosov, Appl. Phys. Lett., 64, 178, 1994.
- 6) K. Yamanaka and S. Nakano, Jpn. J. Appl. Phys. 35, 93, 1996.
- 7) U. Rabe, K. Jansen and W. Arnold, Rev. Sci. Instrum, 67, pp.3281-3293, 1996.
- 8) K. Yamanaka, Y. Maruyama, T. Tsuji and K. Nakamoto, Appl. Phys. Lett., 78, 1939, 2001.
- 9) T. Tsuji and K. Yamanaka, Rev. Sci. Instrum, 2006.

■1 群 - 10 編 - 4 章

---

4-2 環境計測

(※準備中)

## ■1群 - 10編 - 4章

### 4-3 弾性表面波応用

(執筆著：野村 徹) [2009年7月受領]

弾性表面波 (Surface acoustic wave : SAW) を用いた計測で、一番に挙げられるのがセンサである。SAW は固体表面に沿って伝搬する横波で、固体の深さ方向に対しては1波長の範囲にそのエネルギーが集中している。また固体と接する空間に対しては、そのすべてをさらしている。このため SAW の伝搬は、周りの空間や固体表面の環境から強い影響を受ける。この特徴は、電子デバイスとして利用するときには非常なデメリットとなるが、周囲の環境を電氣的にとらえるときには好都合である。

ここでは、SAW を利用したセンサについて説明する。特に SAW には、SV (Shear vertical または Rayleigh) モードと SH (Shear horizontal) モードが存在し、それぞれ伝搬特性に大きな特徴を有し、センサとしての利用のされ方にも違いがある。ここでは、それらの特徴に合わせた弾性表面波を利用したセンサについて述べる。

#### 4-3-1 弾性表面波デバイス<sup>1)</sup>

##### (1) 弾性表面波の種類

弾性表面波デバイスは、交差指型電極 (Interdigital transducer : IDT) の発明により飛躍的に発展した<sup>2)</sup>。水晶などの結晶や圧電セラミックスなどの圧電基板の上では、SAW は IDT により簡単に励起される。一般に IDT により励起される SAW は、粒子変位が波動の伝搬方向と表面に垂直な Shear vertical mode (SV モード) の表面波 (Rayleigh 波) である。しかし、LiTaO<sub>3</sub> などの結晶では、カットと伝搬方向を適当な方向に選ぶと、粒子変位が波動の伝搬方向に垂直で、表面に平行な Shear horizontal mode (SH モード) の表面波が励起される<sup>3)</sup> (図 4・5 参照)。SV モードの SAW は、液体中では表面に垂直な粒子変位によりエネルギーを放射するため、液体のセンシングには向かないが、SH モードの SAW は液体用としても気体用としても利用できる。またこの波は、エッジに垂直に入射すると、ほかの波にモード変換することなく、完全反射する性質を有する。

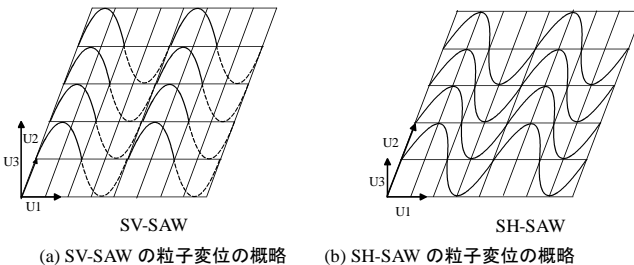


図 4・5 SAW のモードと粒子変位の方向

##### (2) センサデバイス

センサに使われる SAW デバイスには、主に遅延線、共振器、そして反射型遅延線の三つが



ある(図4・6参照)。遅延線は、最も一般的にセンサに用いられる SAW デバイスで、一定の距離を隔てて配置された入出力用の IDT 間をセンシング面にする。共振器は、エネルギーを閉じ込めるための二つの反射器用のグレーテングの間に、入出力用の IDT を一つまたは二つが配置されている。各々は、1 ポート及び 2 ポート共振器と呼ばれている。このデバイスは、共振特性が非常に鋭く、安定性に優れている。反射型遅延線は、入出力用の一つの IDT と伝搬路上の反射器用のグレーテングから構成される。また新しいタイプの反射型遅延線では、図4・6(d)のように基板の端面(エッジ)での反射を利用する<sup>4)</sup>。

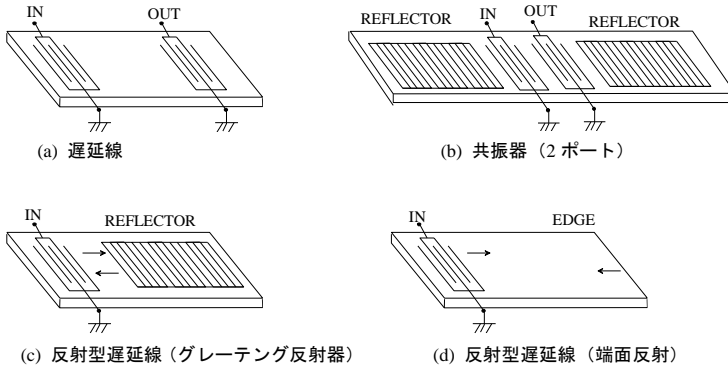


図4・6 センサデバイスの種類

#### 4-3-2 センサの動作原理<sup>5,6)</sup>

SAW センサの原理は、圧電基板の上を伝搬する波が環境から受ける物理的及び化学的な影響を測定することによる。このため検出できる対象には、機械的な物理量と電気的な物理量及びイオンや分子の吸着などによる化学量がある。これらの対象による効果は、質量負荷効果と音響電気相互作用と呼ばれている。質量負荷効果では、検出の対象が SAW の伝搬面に物質が付着することにより、速度・振幅が変化することを利用する。また、音響電気相互作用では、付着または周囲の気体の導電率や誘電率により、圧電基板を伝搬する SAW の伝搬特性が変化することを利用している。したがって、測定する対象の特性により検出する現象を選ぶ必要がある。

液体を対象にする場合、SV-SAW は液体が負荷されると減衰が非常に大きくなるため、SH-SAW のデバイスが用いられる。SH-SAW の伝搬特性は、負荷液体の粘性 $\eta$ と密度 $\rho$ の積の平方根 $(\rho\eta)^{1/2}$ に比例する。また、液体の電気的性質による音響電気相互作用によっても、SH-SAW の伝搬特性は変化する。

また後述の化学センサのように、感応膜と呼ばれる薄膜を用いる場合には、膜のステフネスの変化も速度・振幅に影響を与える。この現象は、膜に高分子膜を用いる場合に顕著である。

SAW センサの動作・感度などについて、詳しくは文献 1)、5)及び6)を参照されたい。

#### 4-3-3 センサの構成<sup>5)</sup>

環境変化による SAW の伝搬特性の変化を測定するには、一般的な方法がいくつかある。

図 4・7 に、よく使われる三つの測定方法について示す。

### (1) ネットワークアナライザによる測定

この方法は、デバイスの入出力間の周波数特性を測定する方法で、振幅特性と位相特性が同時に測定できる (図 4・7(a))。測定は非常に単であるが、装置が高価である割に、十分な精度と分解能が得られない。しかし、デバイスの全体的な特性を把握するのに適する。

### (2) 発振回路構成による測定

2 端子の SAW デバイスをセンサに利用する場合に、最も一般的に用いられる方法で、センサデバイスを増幅器の帰還回路とし、速度変化を発振周波数の変動として測定する (図 4・7(b))。初めの速度を  $v$ 、そのときの発振周波数を  $f$  とすると、それぞれの変化  $\Delta v$  と  $\Delta f$  の間には、 $\Delta v/v = \Delta f/f$  の関係がある。この方法は、変化が周波数の変化として得られるため、その後の処理が容易である。また周波数の測定は非常に正確に行えるため、高精度な測定が可能である。

### (3) 位相干渉法による測定

この方法は、周波数を固定し、速度変化により生ずる位相の変化を干渉法により測定する方法で、微小な位相変化を正確に測定する (図 4・7(c))。位相測定には、ベクトル電圧計や位相干渉計としてミキサ (DBM) が用いられる。特にミキサによる測定は、高分解能で正確な測定が可能で、実用的な方法である。

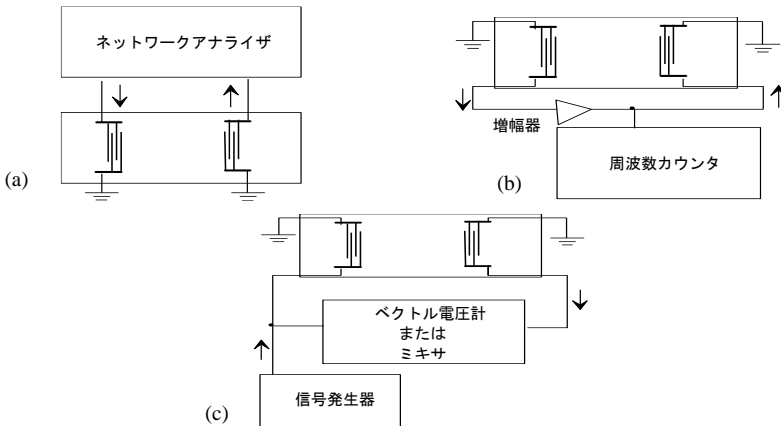


図 4・7 センサシステムの構成<sup>5,6)</sup>

## 4-3-4 弾性表面波センサ<sup>1,5,6)</sup>

### (1) 液体センサ

弾性表面波の粒子変位の方向は、SAW センサの液体中での動作に重要な意味をもつ。一般にレーリー波のように SV モードの SAW の場合、表面に垂直な成分が大きいいため、伝搬中

に縦波としてエネルギーを放射するため、その減衰は非常に大きい。一方 SH-SAW の場合、エネルギーの放射は粘性により生ずるが、その減衰はそれほど大きくない。このため、液体のセンシングには SH-SAW が使われる。特に SH-SAW の伝搬特性は、負荷された液体の粘性及び密度の積の平方根に比例するため、粘性センサに使用されている。また、SV-SAW と同様に、液体のイオンや誘電率などの電気的特性も利用できる。

## (2) 物理センサ

物理的な性質が SAW の伝搬特性に与える量を計測するセンサで、温度センサや歪みセンサがこれに該当する。これらのセンサでは、外的な力や温度などの物理的要素によって伝搬路長が極わずかに変化する。この伝搬長の変化を、速度変化として測定する。歪みセンサや温度センサなどがこれに該当する。歪みを利用したセンサには、上記のほかに加速度センサなどが挙げられる。また、温度による膨張を利用したセンサには、流量センサなどがある。

## (3) 化学センサ

化学センサまたはガスセンサは、雰囲気中に含まれる微量な化学物質を検出し、分子識別をすることを目的にしている。一般的な SAW による化学センサの形状を図 4・8 に示す。化学種を選択的に検出するため、SAW の伝搬面に感応膜と呼ばれる非常に薄い膜をもった構造をしている。感応膜は、検出対象の物質の化学的性質より決定される。

しかし、単一の SAW センサではガス分子の識別は正確に行うことは困難である。そのため、SAW センサは同一平面に複数並べてつくることができる利点を生かし、それぞれのセンサに異なる感応膜を塗布し、各々のセンサの出力より得られるパターンより分子を識別する方法が用いられる。

## (4) SAW ID センサ<sup>4,7)</sup>

このセンサは、一つの入出力用 IDT と複数の反射器からなり、IDT は直接アンテナに接続されている (図 4・9 参照)。アンテナが質問用のパルスを受波すると IDT が SAW を励起し、SAW は各々の反射器により反射される。この波は、再び IDT で電気信号に変換され、アンテナから再放射される。このため得られる応答は、反射器の位置により決まるパルス列を生ずる。このパルス列により ID タグを構成するとともに、無給電センサとしてリモートセンシングを行う。

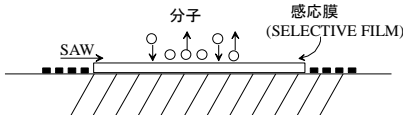


図 4・8 化学 SAW センサの感応膜

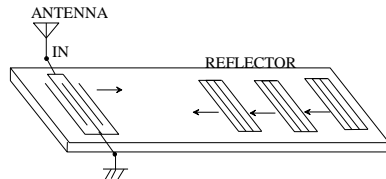


図 4・9 SAW-ID センサ (リモートセンサ用)

**■参考文献**

- 1) 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会編, “弾性波デバイス技術,” オーム社, pp.405-418, 1999.
- 2) R.M. White, and F.W. Voltmer, “Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves,” Appl. Phys. Letters, vol.7, pp.314-316, 1965.
- 3) K. Nakamura, M. Kazumi, H. Shimizu, “SH-type and Rayleigh-type surface waves on rotated Y-cut LiTaO<sub>3</sub>,” Proc.1977 IEEE Ultrasonics Symposium, pp.37-40, 1977.
- 4) T. Nomura, T. Kosaka, A. Saitoh, “Functional passive sensor system using reflective SAW delay line,” Materials and Devices for Smart Systems II, (MRS Symposium Proceedings), vol.888, pp.173-184, 2006.
- 5) H. Baltes, W. Gopel, J. Hesse, “Sensors Update,” pp.38-77, VCH, 1996.
- 6) J.W. Grate, S.J. Martin, R.M. White, “Acoustic wave microsensors Part 1,” Analytical Chemistry, vol.65, pp.940A-948A, 1993.
- 7) A. Pohl, “A review of wireless SAW sensors,” IEEE Trans. on UFFC, vol.47, no.2, pp.317-332, 2002.

## ■1 群 - 10 編 - 4 章

### 4-4 非破壊検査（電磁超音波センサによる計測）

（執筆者：荻 博次）[2009年2月 受領]

高エネルギー放射光以外の電磁波では金属材料の内部を奥深く検査することは難しく、構造用金属材料の非破壊検査においては、より簡便性と安全性に優れた超音波が広く利用されている。非破壊検査の対象は主に三つ存在する。第一に、事故に直結するき裂や腐食欠陥である。第二に、それらの起点となる（疲労やクリープなどに付随して進行する）組織変化。そして、第三にき裂の助長や材料の降伏を支配する応力場である。一般にこの順番に計測と定量化が難しくなる。

非破壊検査には超音波の様々な特性量が利用される。振幅、音速（伝ば時間）、減衰（内部摩擦と散乱減衰）、非線形量（波形の歪み）などである。計測対象以外の要因もこれらに影響を与えるため、絶対・定量測定においては注意を要する。例えば、減衰は超音波が材料内を伝ばする際に生ずる損失（吸収と散乱）の大きさを表す。欠陥や析出物による散乱や転位などの格子欠陥による吸収がこれを増加させる。しかし、接触測定の場合、超音波センサや音響結合剤で発生する損失も甚大であり、検査対象に起因する減衰を大きく上回ることもある。応力評価においても接触による誤差は大きい。音速が応力に比例することを利用し、音速測定により応力評価を行うことができる<sup>1)</sup>が、応力が引き起こす音速の変化率は1 MPa に対し0.001%程度と小さい。音響結合剤による波形の乱れや位相のずれが音速の測定精度を低下させるが、これが応力評価値を大きくシフトする場合も多い。非線形量の測定においても接触測定が問題となることがある。検査対象が発生する非線形量だけではなく、超音波センサと試料の接触界面がつくる非線形量が計測に加わるためである。

以上のように、超音波を用いた非破壊検査においては材料に依存した特性量のばらつきや計測システムが生ずる見かけの特性量の変化が問題となることが多く、これらが検査対象よりも優位であることも少なくはない。したがって重要なことは、(1) 相対的な測定に意義を見いだす、(2) 検査対象だけに影響を受ける特性量を利用する、(3) 材料内の特性量の変化を純粋に抽出することのできる計測法を利用する、という事項である。(1)においては、健全部の特性量を基準としたイメージングや、応力が作用しない箇所の音速を基準とした応力測定などが挙げられる。(2)に対しては、閉じたき裂が特徴的に発生するサブハーモニック非線形量<sup>2)</sup>や疲労の特定の段階で発生する減衰ピーク<sup>3)</sup>などがある。本報においては、(3)の事項を可能にする電磁超音波センサ（Electromagnetic Acoustic Transducer：EMAT）を用いた非破壊検査手法を紹介する。EMAT（イーマツト、あるいは、エマツトと発音される）は電磁気的な作用により非接触に超音波を励起・受信することができる。

#### 4-4-1 EMAT

EMAT は試料が強磁性体、圧電体、電導体のとき使用することができる\*。それぞれ、磁わい、電わい、ローレンツ力が音源の主要因となる。構造は単純である。平面コイルあるいは試料形状にフィットした曲面コイルと、永久磁石あるいは電磁石から構成される。コイルに高周波電流を流し、試料表面に振動電場や振動磁場を発生させる。試料が圧電体のとき、

\* いずれにも相当しない材料においても、表面に導電性膜などを成膜することにより適用可能となる。

振動電場により試料内に音源が発生する。試料が強磁性体のとき、振動磁場により磁わいが振動し音源が生ずる。バイアス磁場によりあらかじめ磁わいの向きを揃えておくことで、超音波の発生効率を上昇する。磁石はこのために用いる。試料が電気伝導性を示すとき、コイルからの振動磁場により試料表面に渦電流が励起される。これと外部磁場との相互作用によりローレンツ力が発生し、超音波源となる。例えば、図 4・10 は、試料表面に平行に偏向し、表面と垂直方向に伝ばする横波を送信・受信する EMAT である。このほかにもコイルと磁石の幾何学的な組合せにより様々な形態の EMAT が考案されてきた。プリント基板技術を用いて任意形状のコイルパターンをフレキシブルな樹脂シート上に作成することもできる。これにより、蛇行コイルやチャープ波形形状を有するコイルなどの作製も容易となる。磁石を周期的に配列することもできる。コイルや磁石の周期性は音源の周期性(波数)でもあるため、波数を指定することができる。これはガイド波のように分散性を示す超音波モードを利用する非破壊検査において大変便利である。特定のモードを選択的に励起・検出することができるためである。

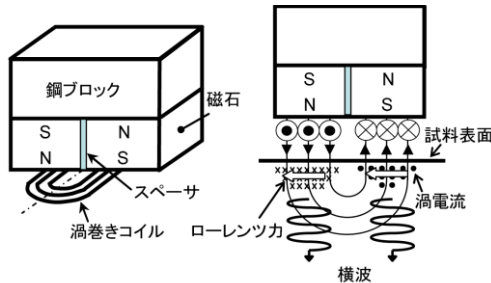


図 4・10 横波用 EMAT の模式図 (左) とローレンツ力による横波励起の原理 (右)

EMAT の構造と各 EMAT の詳細なメカニズムは、Thompson<sup>4)</sup>、Kawashima<sup>5)</sup>、Alers<sup>6)</sup>、Hirao and Ogi<sup>7)</sup> らによって研究されてきた。Thompson<sup>4)</sup> 及び Hirao and Ogi<sup>7)</sup> のテキストには各用途に応じた EMAT の具体的な構造と作製方法、メカニズムがまとめられている。

圧電型の超音波探触子と比較した場合の利点と欠点を以下に挙げる。

【利点】非接触測定可能 (たかだか数 mm ではあるが)。優れたモード選択性 (ガイド波を扱う際には特に有効)。正確な減衰測定 (非接触ゆえ)。横波励起が得意。

【欠点】変換効率が低い。測定装置が高価。

#### 4-4-2 パイプの非破壊検査

図 4・11 は直径 216 mm、肉厚 6.3 mm の鋼パイプの人工腐食欠陥の非破壊検査例である<sup>8)</sup>。パイプの内壁に車輪付きの EMAT を設置する。EMAT はパイプの周方向に伝ばするせん断波板波 ( $SH_1$  モード) を励起・受信しながら軸方向に走行する。板波はパイプを周回して同じ EMAT により受信される。この EMAT は永久磁石の磁極を周方向に周期的に配置した構造を有し、磁石の周期に一致する波数のガイド波のみを選択的に送信・受信する。円周上の伝ば経路に欠陥が存在すると、散乱による透過波の振幅の減少及び伝ば時間の変化が発生し、欠陥の存在として認識される。つまり、ある軸方向位置の断面の健全性を評価する。

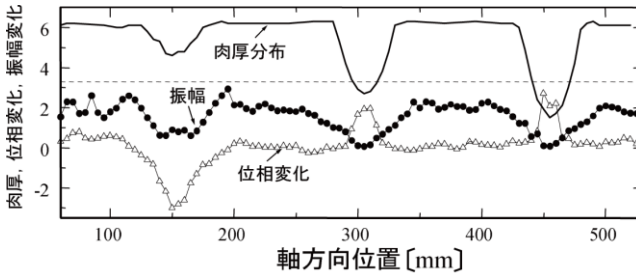


図 4-11 パイプ内壁に設置された EMAT によるパイプ外表面の楕円状欠陥の非破壊検査<sup>8)</sup>。周方向に伝ばするせん断波板波 (SH<sub>1</sub> モード) の振幅 (任意単位) と位相 (rad) をプロット。位相変化は伝ば時間の増分に対応する。実線は肉厚分布 [mm]。破線はカットオフ板厚。

SH<sub>1</sub> 板波は分散性を示し、ある周波数に対しては任意の板厚において存在することができない。板厚の減少にともない群速度は減少してゆき、ある板厚以下では伝ばできなくなる。この板厚をカットオフ板厚と呼ぶ。カットオフ板厚の前後において、板波の伝ば形態は大きく変化する。例えば、図 4-11 において、欠陥部の残存肉厚がカットオフ板厚を下回ったとき、伝ば時間 (位相) が増加する。欠陥内部を伝ばすることができず、板波が欠陥を回り込むために伝ば距離が増加するからである。このように、板波などのガイド波の分散性を巧みに利用することにより、欠陥深さの高速スクリーニングが可能となる。

#### 4-4-3 超音波と金属の疲労

金属の鐘を鳴らすとやがて鳴り止むが、これは空气中に音のエネルギーが漏れるためだけでなく、むしろ金属内部で音のエネルギーが消費されるためである。金属内部には転位や双晶などの格子欠陥が多く存在し、それらが擬弾性的に振動し、結果的に音のエネルギーを熱に変換して消費する<sup>9)</sup>。超音波も金属内部の格子欠陥の擬弾性運動を誘発して減衰するため、超音波の減衰は格子欠陥、特に転位組織の変化に敏感に反応する。ただし、伝ばする領域にわたる平均の内部組織を反映するため、局在する一本の転位や一個の空孔などは検知できない。

金属の疲労においては様々な内部組織の変化が起こる。材質や応力振幅などに依存するが、必ず転位組織の変化とき裂の発生・進展を伴う。超音波によってこれらの組織変化を検出することができれば、余寿命評価につながる。ただし、以下の 2 点を満足しなければならない。

① 表面波を使用する：疲労による組織変化は表面から起こり、また表面だけに限定される場合がほとんどである。材料内部を伝ばする超音波を使用すると、表面に限定される組織変化の検出感度が低下する。② 非接触測定を行う：接触式の計測法には重大な欠点がある。鳴り響いている金属に「触る」ことにより振動を検出するため、減衰の評価が困難となる。鳴り響いている鐘の振動を測定しようとして鐘に触れると直ちに振動は鳴り止む。振動のエネルギーが接触したセンサへ漏れるためである。このように、振動体に接触して振動特性を計測するという試み自体が材料内の振動特性を著しくかき乱し、正確な計測を妨げる。

EMAT の非接触性とモード選択性は上記の条件を満足する。非接触状態で試料表面のみを

伝ばする表面波モードを選択的に励起・検出することにより、表面波の減衰を正確に測定することができる。図4・12(a)は、炭素鋼の回転曲げ疲労試験に伴う表面波横波の減衰と非線形量をモニタリングした例である。表面波の浸透深さは約0.45 mmである。非接触測定のため疲労試験を中断することなくこれらの超音波特性を連続計測することができる。減衰は必ず寿命の一定の割合において鋭いピークを示す。非線形量には二つのピークが現れる。第一ピークは減衰ピークよりも早い段階で現れ、第二ピークは減衰ピークとほぼ同時期に現れる。透過型電子顕微鏡による組織観察の結果、減衰ピーク及び非線形量の第二ピークは転位組織の劇的な変化(固執すべり帯からセル構造へ)に起因することが明らかとなっている<sup>3)</sup>。この組織変化の過程で一時的に生成される孤立した長い転位が擬弾性的に振動し、超音波エネルギーを吸収し、非線形量を増加させる。非線形量の第一ピークは表面き裂の発生に起因する<sup>10)</sup>。

注目すべきは、減衰ピーク及び非線形量の第一ピークが寿命の一定の割合で現れることである。破断サイクル数にも依存しない(図4・12(b))。この現象を応用すると、疲労寿命を正確に評価することが可能となる。

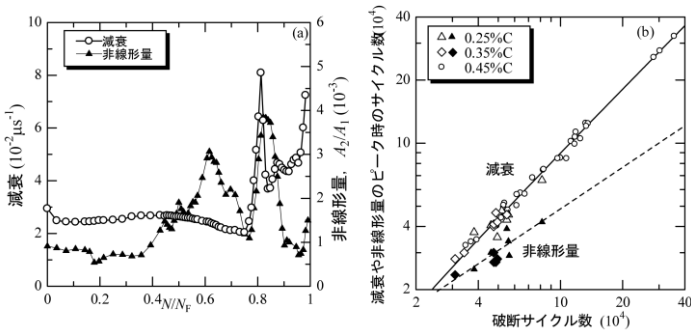


図4・12 (a) 直径 14 mm の炭素鋼丸棒の回転曲げ疲労試験に伴う減衰と非線形量の変化<sup>10)</sup>。非線形量は、基本波の振幅  $A_1$  と 2 次高調波の振幅  $A_2$  の比により定義されている。(b) 減衰ピーク及び非線形量一ピークと破断サイクル数の関係<sup>3,10)</sup>。

#### 4-4-4 応力測定

外力により固体が弾性変形すると、弾性定数と密度が変化する。ある方向に一軸の圧縮外力が作用した場合、この方向の原子間距離が小さくなり、原子間相互作用が高まり、一般にその方向の変形にかかわる弾性定数は増加する。このとき密度も増加する。超音波の音速は、 $\sqrt{\text{弾性定数}/\text{密度}}$ により与えられるが、一般に弾性定数の変化量が密度のそれを上回るため、この方向に伝ばする縦波の音速は増加する。つまり、超音波の音速を正確に測定することにより、応力を評価することができる。微小変形においては、音速の変化率  $\frac{\Delta V}{V}$  は応力に比例する：



$$\frac{\Delta V}{V} = C_A \sigma + B_0 \quad (4 \cdot 1)$$

比例定数  $C_A$  を音弾性定数と呼び、材料によって決まる定数であり、同じ材料であればほぼ一定値を示す<sup>1)</sup>。式(4・1)における応力は六つの独立な成分のいずれか、あるいは、それらの線形結合である。 $B_0$  は応力に依存しない音速によって決まる定数である。材料間ではもちろんのこと、同一化学成分の材料においても、圧延率や熱処理などによりばらつき、このばらつきは応力による音速変化を上回る。したがって、一般には  $B_0$  値が既知でなければ超音波を用いた応力評価を行うことができない。応力が作用しない箇所の音速値から  $B_0$  を推測することや、応力負荷前後の差を測定するなどして、 $B_0$  にかかわる不確定性を軽減する必要がある。

図 4・13 は鋼の溶接板の残留応力評価例である<sup>1)</sup>。図 4・10 の EMAT を用いて電磁超音波共鳴法<sup>†</sup>によって測定した。 $B_0$  は、溶接線から十分に離れた端部において計測した音速より求めた。超音波測定の結果は、歪みゲージによる測定値とよく対応している。このように  $B_0$  値に関する情報を得られる場合は、超音波応力測定は有効な手段である。

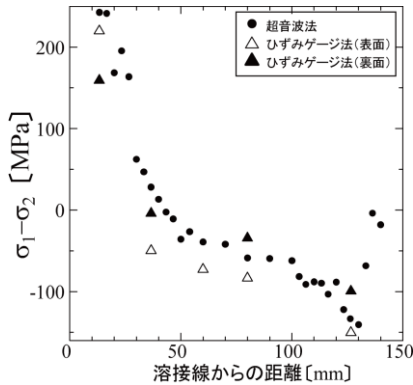


図 4・13 厚さ 19 mm の鋼板の溶接線近傍の応力測定<sup>1)</sup>。1 と 2 はそれぞれ溶接線方向及びそれに垂直な方向の垂直応力を表す。歪みゲージ法においては、2 軸の歪みゲージを試料表面に貼り付けてから試料を小片に切断し、開放した歪みを測定することにより残留応力を評価した。

## ■参考文献

- 1) 福岡秀和, 戸田裕己, 平尾雅彦, “音弾性の基礎と応用,” オーム社, 1993.
- 2) K. Yamanaka, T. Mihara, and T. Tsuji, “Evaluation of closed cracks by analysis of subharmonic ultrasound,” Insight, vol.46, no.11, pp.666-670, 2004.
- 3) H. Ogi, Y. Minami, and M. Hirao, “Acoustic study of dislocation rearrangement at later stages of fatigue: Noncontact prediction of remaining life,” J. Appl. Phys., vol. 91, no.15, pp.1849-1854, 2002.
- 4) R.B. Thompson, “Physical principles of measurements with EMAT transducers,” Academic Press, New York, in Physical Acoustics, vol.19, pp.157-200, 1990.

<sup>†</sup> 共振法と EMAT を組み合わせることにより、共振状態の多重エコーを同位相で受信し、EMAT の低変換効率を補うことができる。これを電磁超音波共鳴法と呼ぶ<sup>7)</sup>。

- 5) K. Kawashima, "Electromagnetic acoustic wave source and measurement and calculation of vertical and horizontal displacements of surface waves," IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, vol. SU-32, pp.514-522, 1985.
- 6) G. Alers and H. Ogi, "EMAT techniques", in Handbook of Elastic Properties of Solids, Liquids, and Gases, vol.I, edited by M. Levy, H. Bass, R. Stern, and V. Keppens, Academic Press, New York, pp.263-281, 2001.
- 7) M. Hirao and H. Ogi, "EMATs for science and industry : Noncontacting ultrasonic measurements," Kluwer Academic, 2003.
- 8) M. Hirao and H. Ogi, "An SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection," NDT&E International, vol.32, pp.127-132, 1999.
- 9) 比企能夫, "弾性・非弾性," 共立出版, 1972.
- 10) H. Ogi, S. Aoki, and M. Hirao, "Noncontact monitoring of surface-wave nonlinearity for predicting remaining life of fatigued steels", J. Appl. Phys., vol.90, no.1, pp.438-442, 2001.
- 11) 荻博次, 平尾雅彦, "電磁超音波共鳴法による溶接残留応力の非接触測定," 非破壊検査, vol.45, pp.526-530, 1996.